

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentor  
Prof. dr. sc. Ivan Juraga

Dalibor Brkić

Zagreb, 2008.

## **Sažetak diplomskog rada**

Diplomski rad sastoji se od dvije cjeline:

- Teorijskog dijela
- Praktično - eksperimentalnog dijela

U teorijskom dijelu obrađena je problematika korozijskih oštećenja u zrakoplovstvu. Opisani su materijali koji se najčešće upotrebljavaju te njihovo ponašanje u odnosu na pojavne korozijske oblike. Ukratko su prikazane metode koje se koriste u sprečavanju pojave korozije te moguća oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uslijed djelovanja korozije.

Praktično – eksperimentalni dio se sastoji od:

- snimanja stanja zrakoplova Canadair CL-415 u okviru redovitog godišnjeg pregleda i upoznavanja sa tehnologijom zaštite od korozije u Zrakoplovno tehničkom zavodu;
- pripreme i bojenja ispitnih uzoraka u Zrakoplovno tehničkom zavodu;
- ispitivanja u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu; pripremljeni uzorci ispitani su na otpornost prema koroziji u agresivnom mediju (slana komora, uranjanje u 3.5% -tnu otopinu NaCl).



## **SADRŽAJ:**

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
1.1. Ekonomsko značenje korozije	2
1.2. Korozija u zrakoplovstvu	3
<b>2. KLASIFIKACIJA KOROZIJSKIH PROCESA</b>	<b>4</b>
2.1. Mehanizmi procesa korozije	4
2.1.1. Kemijska korozija	4
2.1.2. Elektrokemijska korozija	5
2.2. Geometrijska klasifikacija korozije	7
2.2.1. Opća korozija	7
2.2.2. Lokalna korozija	7
2.2.2.1. Rupičasta korozija	8
2.2.2.2. Potpovršinska korozija	9
2.2.2.3. Kontaktna korozija	9
2.2.2.4. Napetosna korozija	11
2.2.3. Selektivna korozija	11
2.2.4. Interkristalna korozija	12
2.3 Utjecaj različitih okoliša na korozijske procese	13
2.3.1. Atmosferski uvjeti	13
2.3.2. Morski okoliš	13
2.3.3. Pustinjski okoliš	13
<b>3. KOROZIJSKI POSTOJANI MATERIJALI U ZRAKOPLOVSTVU</b>	<b>14</b>
3.1. Aluminij i njegove legure	14
3.1.1. Korozijska postojanost aluminija	15
3.1.2. Legure aluminija	16
3.1.3. Oksidne prevlake na aluminiju	17
3.1.4. Otpornost aluminija prema različitim pojavnim korozijskim oblicima	20
3.1.5. Primjena aluminija i njegovih legura u zrakoplovstvu	22
3.1.5.1. Legure aluminija korištene na zrakoplovu Canadair CL-415	22
3.2. Titan i njegove legure	23
3.2.1. Korozijska postojanost titana	23

3.2.2. Legure titana	24
3.2.3. Otpornost titana prema različitim pojavnim korozijskim oblicima	24
3.2.4. Primjena titana i njegovih legura u zrakoplovstvu	26
3.2.4.1. Legure titana korištene na zrakoplovu Canadair CL-415	26
3.3. Nikal i njegove legure	27
3.3.1. Korozijska postojanost nikla	27
3.3.2. Legure nikla	28
3.3.3. Otpornost nikla prema različitim pojavnim korozijskim oblicima	29
3.3.4. Primjena nikla i njegovih legura u zrakoplovstvu	31
3.4. Magnezij i njegove legure	32
3.4.1. Korozijska postojanost magnezija	32
3.4.2. Legure magnezija	33
3.4.3. Otpornost magnezija prema različitim pojavnim korozijskim oblicima	33
3.4.4. Primjena magnezija i njegovih legura u zrakoplovstvu	34
<b>4. METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE U ZRAKOPLOVSTVU</b>	<b>35</b>
4.1. Odabir materijala	35
4.2. Odabir zaštitnih prevlaka	35
4.3. Drenaža	36
4.4. Brtvila	37
4.5. Upotreba inhibitora	38
4.6. Pristup za održavanje	39
4.7. Programi zaštite od korozije	39
<b>5. KOROZIJSKA OŠTEĆENJA ZRAKOPLOVNIH KONSTRUKCIJA</b>	<b>40</b>
5.1. Glavne komponente zrakoplova podložne koroziji	40
5.1.1. Oplata zrakoplova	40
5.1.2. Preklopni spojevi i spojni elementi	40
5.1.3. Električni sustavi	41
5.1.4. Konstrukcijske komponente	41
5.1.5. Zrakoplovni motori	41
5.1.6. Komponente helikoptera	42
5.1.7. Ostali sustavi zrakoplova	42

5.2. Oblici korozijskih oštećenja zrakoplovnih konstrukcija	43
5.2.1. Opća korozija	43
5.2.2. Korozija u procijepu	44
5.2.3. Galvanska korozija	44
5.2.4. Rupičasta korozija	45
5.2.5. Napetosna korozija	47
5.2.5. Interkristalna korozija	47
5.2.6. Crvolika korozija	49
5.2.7. Mikrobiološka korozija	50
5.3. Oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uslijed zamora materijala	51
 <b>6. PROTUPOŽARNI ZRAKOPLOV CANADAIR CL – 415</b>	 <b>53</b>
6.1. Zaštita od korozije zrakoplova Canadair CL- 415	56
6.2. Redoviti godišnji pregled zrakoplova Canadair CL- 415	58
6.2.1. Korozijska oštećenja	58
6.2.2. Primjeri oštećenja nastalih tijekom eksploatacije	60
6.2.3. Sanacija pukotine na valobranu	61
 <b>7. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	 <b>63</b>
7.1. Priprema i bojenje uzoraka	64
7.2. Ispitivanje u slanoj komori	65
7.3. Ispitivanje uranjanjem u 3.5% -tnoj otopini NaCl	69
 <b>8. ZAKLJUČAK</b>	 <b>72</b>
 <b>9. LITERATURA</b>	 <b>73</b>
 <b>10. PRILOG</b>	 <b>75</b>

## Popis slika

Slika 1-1 Troškovi uzrokovani korozijom u sektoru transporta[2]	2
Slika 1-2 Korozija u zrakoplovstvu	3
Slika 2-1 Kemijska korozija – oksidacija metala u vrućem zraku[5]	5
Slika 2-2 Elektrokemijska korozija metala u kiseljoj otopini[5]	6
Slika 2-3 Opća korozija[6]	7
Slika 2-4 Rupičasta korozija[5,7]	8
Slika 2-5 Galvanska kontaktna korozija[5,7]	10
Slika 2-6 Korozija u procijepu[5,7]	10
Slika 2-7 Napetosna korozija[5,7]	11
Slika 2-8 Selektivna korozija u obliku grafitizacije sivog lijeva[7]	12
Slika 2-9 Interkristalna korozija [7]	12
Slika 3-1 Pojavni korozijski oblici na aluminiju i njegovim legurama[7]	20
Slika 3-2 Pojavni korozijski oblici na aluminiju i njegovim legurama[7]	21
Slika 3-3 Pojavni korozijski oblici na titanu i njegovim legurama[7]	25
Slika 3-4 Korozijska oštećenja na dijelovima od legura nikla[7]	29
Slika 3-5 Pojavni korozijski oblici na niklu i njegovim legurama[7]	30
Slika 3-6 Galvanska korozija magnezija[7]	34
Slika 4-1 Drenaža donjeg dijela strukture zrakoplova[15]	36
Slika 4-2 Drenaža donjeg dijela strukture zrakoplova[15]	37
Slika 4-3 Upotreba brtvila[15]	38
Slika 5-1 Upravljač zrakoplova[7]	43
Slika 5-2 Kormilo visine patrolnog zrakoplova ratne mornarice[7]	44
Slika 5-3 Komponenta podvozja zrakoplova[7]	45

Slika 5-4 Komponente zrakoplovnog motora[7]	46
Slika 5-5 Komponenta podvozja zrakoplova[7]	47
Slika 5-6 Komponente patrolnog zrakoplova ratne mornarice[7]	48
Slika 5-7 Kućište kotača na zrakoplovu[7]	49
Slika 5-8 Vratašca zrakoplovnog spremnika goriva[7]	50
Slika 5-9 Nosač prozora na zrakoplovu[7]	51
Slika 5-10 Spoj trup – krilo poljoprivrednog zrakoplova[17]	52
Slika 6-1 Canadair CL-415[18]	53
Slika 6-2 Princip usisavanja vode[18,19]	54
Slika 6-5 Primjena inhibitora[18]	57
Slika 6-6 Spremnik za vodu[18]	58
Slika 6-7 Noseća konstrukcija panela poda[21]	59
Slika 6-8 Korozija na amortizeru[21]	59
Slika 6-9 Oštećenja tijekom eksploatacije[21]	60
Slika 6-10 Smještaj valobrana na zrakoplovu i pojava pukotine[18]	61
Slika 6-11 Sanacija pukotine[18]	62
Slika 7-1 Priprema uzorka za nanošenje primarnog premaza i boje[18]	64
Slika 7-2 Nanošenje primarnog premaza i boje na ispitni uzorak[18]	65
Slika 7-3 Slana komora[22]	66
Slika 7-4 Ispitivanje uzorka broj 1 u slanoj komori[22]	67
Slika 7-5 Uzorak broj 1 nakon 48 sati u slanoj komori[22]	68
Slika 7-6 Ispitivanje uranjanjem u 3.5% -tnoj otopini NaCl[22]	69
Slika 7-7 Ispitivanje uzoraka 2 i 3[22]	70
Slika 7-8 Uzorci 2 i 3 nakon ispitivanja[22]	71

## **Popis tablica**

Tablica 3-1 Fizikalna i mehanička svojstva aluminija[9]	14
Tablica 3-2 Usporedba korozijske otpornosti aluminijskih legura[8]	16
Tablica 3-3 Kemijski sastav aluminijskih legura 2024 i 7075	22
Tablica 3-4 Fizikalna i mehanička svojstva titana[9]	23
Tablica 3-5 Fizikalna i mehanička svojstva nikla[9]	27
Tablica 3-6 Podjela niklovih legura[9]	29
Tablica 3-7 Fizikalna i mehanička svojstva magnezija[9]	32
Tablica 6-1 Osnovni tehnički podaci zrakoplova Canadair CL-415[19]	55
Tablica 7-1 Plan ispitivanja	63
Tablica 7-2 Parametri ispitivanja	66

## Popis oznaka

F	96490 C/mol	Faradayeva konstanta
H	J/K	reakcijska entalpija
I	A	električna struja
$j_k$	A/cm <sup>2</sup>	katodna gustoća struje
m	g	masa izlučene metalne prevlake
M	g/kmol	molarna masa atoma izlučenog metala
S	J/K	reakcijska entropija
$S_k$	cm <sup>2</sup>	katodna površina na koju se nanosi prevlaka
T	K	termodinamička temperatura
t	s	vrijeme prevlačenja
V	cm <sup>3</sup>	volumen prevlake
z		broj elektrona
$\eta_k$	%	katodno iskorištenje struje
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća prevlake
$\delta$	cm	prosječna debljina prevlake

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu "Oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uzrokovanih korozijom" izradio samostalno uz potrebne konzultacije, savjete i uporabu navedene literature.

Dalibor Brkić



## 1. UVOD

Riječ korozija dolazi od latinske riječi **corrodere**, što znači nagristi. Korozija kemijski troši metalne i nemetalne konstrukcijske materijale, pri čemu njezina brzina ovisi o termodinamičkim i kinetičkim uvjetima odnosno o unutarnjim i vanjskim činiteljima. Za unutarnje su činitelje mjerodavna obilježja materijala, a za vanjske činitelje obilježja medija i nametnute fizikalne okolnosti. Oni utječu na pokretačku silu korozije i na otpore koji se suprotstavljaju toj sili. Korozija je gotovo uvijek spontan proces čija je pokretačka sila kemijski afinitet između materijala i medija. Afinitet za bilo koju kemijsku reakciju postoji ako reakcijski sustav ima sposobnost vršenja rada. Mjera afiniteta je maksimalni koristan rad reakcije (reverzibilni rad ili reakcijski rad) koji sustav može dati pri odvijanju procesa. Pri izobarno-izotermnim uvjetima taj rad je jednak smanjenju Gibbsove energije sustava prilikom reakcije, tj. negativnoj promjeni Gibbsove energije:

$$W_r = -\Delta G = -(\Delta H - T\Delta S) = -\Delta H + T\Delta S,$$

gdje je:

$\Delta H$  - reakcijska entalpija, J/K

$\Delta S$  - reakcijska entropija, J/K

$T$  - termodinamička temperatura, K

Reakcijski rad spontane korozijske reakcije mora biti pozitivan. Samo u iznimnim slučajevima korozija nije spontana nego teče, premda u promatranom sustavu nema afiniteta. Tada koroziju pokreće izvana nametnuta sila u obliku električnog napona koji daje struju, pri čemu se troši rad iz vanjskih izvora energije. Takvi su procesi nepoželjno otapanje anoda pri elektrolizi i korozija pod utjecajem lutajućih struja.

Otpori koji se suprotstavljaju pokretačkoj sili korozije dijele se u glavne dvije skupine:

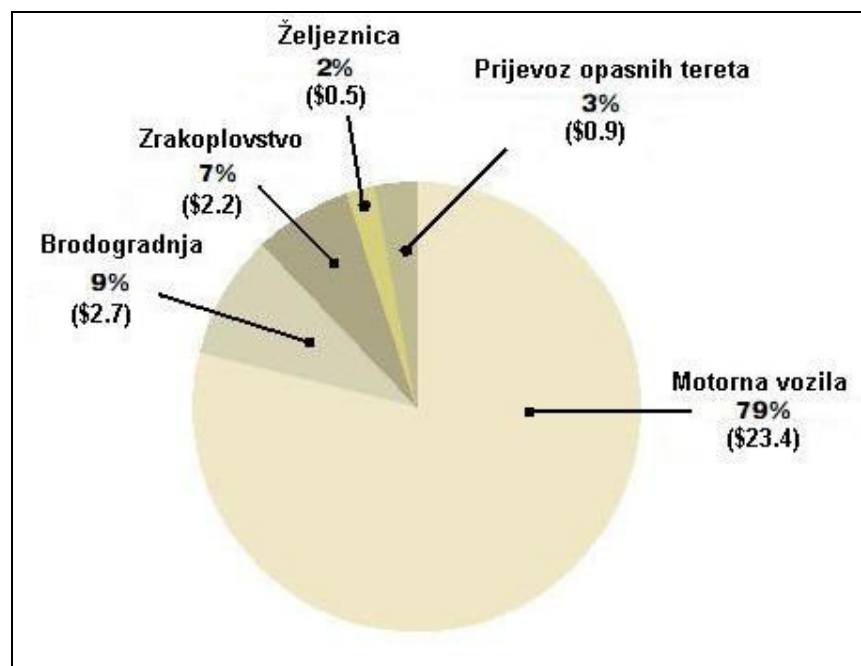
- aktivacijski (kinetički) otpori kojima je uzrok inercija, tj. niska energetska razina reaktanta tako da koroziju mogu izazvati samo reaktanti kojima je sadržaj energije mnogo veći od prosječnoga;
- prijenosni (transportni) otpori zbog sporog prijenosa sudionika procesa, tj. reaktanata u zonu u kojoj se zbiva korozija, odnosno produkata iz te zone.

Brzina korozije na nekom mjestu površine materijala u određenom trenutku razmjerna je pokretačkoj sili (najčešće afinitetu) i obrnuto razmjerna otporima koji joj se suprotstavljaju, a te veličine ovise o lokalnim i trenutačnim unutarnjim i vanjskim činiteljima[1].

### 1.1. Ekonomsko značenje korozije

Korozija smanjuje masu i njegovu uporabnu vrijednost u obliku sirovine, poluproizvoda i proizvoda. Budući da su svi metali u određenim okolnostima podložni koroziji, uslijed korozije nastaju znatni gubici.

U SAD-u je između 1999. i 2001. godine provedena studija "Corrosion costs and preventive strategies in the United States", koja se bavila analizom troškova uzrokovanih korozijom. Rezultati su pokazali da direktni troškovi uzrokovani korozijom dosežu godišnje i do 276 milijardi \$ što iznosi otprilike 3.1 % godišnjeg BDP-a. Od navedenog iznosa 29.7 milijardi \$ odnosi se na sektor transporta. Godišnji troškovi uslijed korozije u sektoru zrakoplovstva procijenjeni su na 2.2 milijarde \$[2].



Slika 1-1 Troškovi uzrokovani korozijom u sektoru transporta (u milijardama \$)[2]

## 1.2. Korozija u zrakoplovstvu

Korozija na zrakoplovu može uzrokovati od jednostavnih oštećenja koji su više neugodan estetski problem, pa do katastrofalnih strukturnih, električnih ili mehaničkih problema. Zbog očitih razloga, korozija je ozbiljan problem vlasnicima i korisnicima vojnih i civilnih zrakoplova. Zrakoplov se susreće sa raznim atmosferskim uvjetima, kao i sa različitim operativnim uvjetima koji se pojavljuju unutar raznih zrakoplovnih sustava. Vrlo je važno znati i razumjeti u kojim će uvjetima zrakoplov biti u eksploataciji te na osnovu toga odabrati prikladne materijale tijekom konstruiranja. Ako se krivo odaberu materijali, posljedice mogu biti iznimno skupa korozijska oštećenja koja uzrokuju neraspoloživost zrakoplova, visoke troškove održavanja i popravaka, ili u ekstremnim situacijama potpuni gubitak zrakoplova i ljudskih života.

	
<p>Zrakoplov Boeing 737 tvrtke Aloha airlines kojemu je 28. travnja 1988. otpao dio gornjeg dijela trupa za vrijeme leta. Korozija je uzrokovala pojavu pukotina u preklopnom spoju gornjeg dijela oplata. Pilot je čudesno uspio prizemljiti zrakoplov[3].</p>	<p>Primjer koji pokazuje kako na prvi pogled beznačajna pojava korozije može uzrokovati katastrofalne posljedice. Galvanska korozija na konektoru zrakoplova F-16. Najmanje 5 zrakoplova je izgubljeno zbog nepravilnog rada ventila za gorivo što predstavlja trošak od 100 000 000 \$ [3].</p>

Slika 1-2 Korozija u zrakoplovstvu

## 2. KLASIFIKACIJA KOROZIJSKIH PROCESA

Korozijske procese dijelimo prema mehanizmu procesa korozije i s obzirom na pojavni oblik korozije. Korozija se javlja i kod metalnih i kod nemetalnih konstrukcijskih materijala, te se među inim koristi i podjela na koroziju metala i koroziju nemetala. Prema mehanizmu procesa korozije metala, razlikujemo kemijsku i elektrokemijsku koroziju. S obzirom na pojavni oblik korozija je opća, lokalna, selektivna i interkristalna.

Korozija nemetala u svim medijima redovito je srodna koroziji metala u neelektrolitima jer nemetali, uglavnom, nisu električni vodiči pa ne mogu izravnom elektrokemijskom reakcijom prijeći u ione.

### 2.1. Mehanizmi procesa korozije

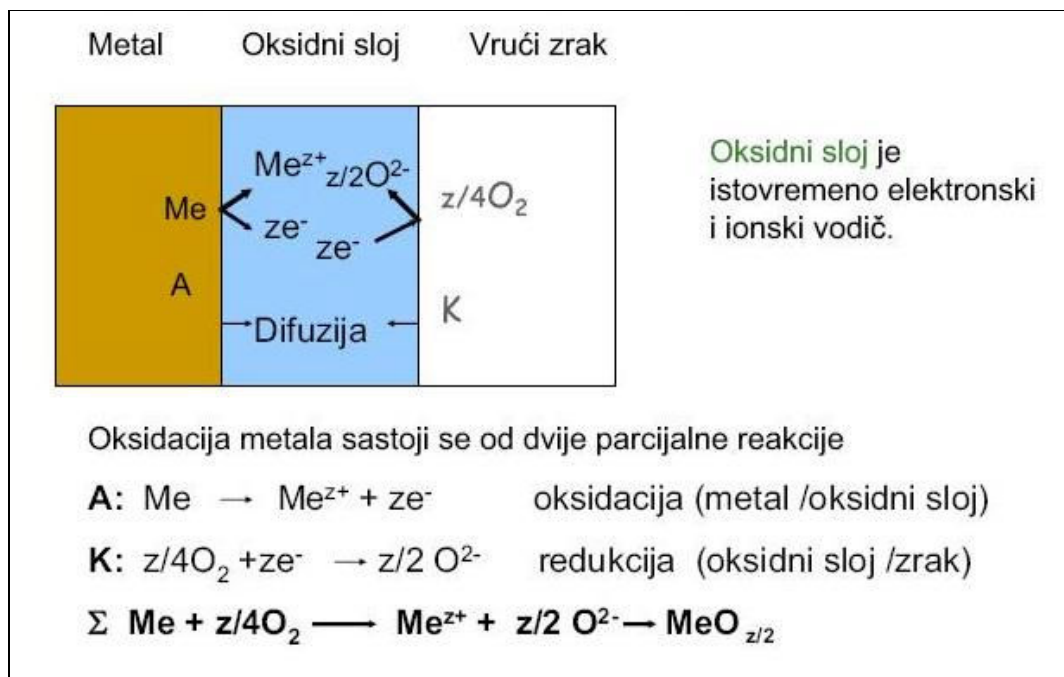
#### 2.1.1. Kemijska korozija

Kemijska korozija metala zbiva se u neelektrolitima, tj. u medijima koji ne provode električnu struju, pri čemu nastaju spojevi metala s nemetalnim elementima (najčešće oksidi i sulfidi). Najvažniji neelektroliti koji u praksi izazivaju kemijsku koroziju metala svakako su vrući plinovi i organske tekućine.

Kemijska korozija metala sastoji se u reakciji atoma metala iz kristalne rešetke s molekulama nekog elementa ili spoja iz okoline, pri čemu izravno nastaju molekule spoja koji je korozijski produkt.

Kemijska korozija u vrućim plinovima (plinska korozija) teče samo uz uvjet da su ti plinovi suhi, tj. da zbog visoke temperature na metalu ne mogu nastati ni tekuća voda ni vodena otopina, bilo kondenzacijom bilo adsorpcijom, jer čim dođe do jedne od tih pojava, odvija se elektrokemijska korozija. Plinska korozija najčešće teče u vrućem zraku i u sagorijevanim plinovima, i to pri vrućoj obradi metala, u pirometalurškim i termoenergetskim postrojenjima, u industrijskim ložištima i pećima, u motorima s unutarnjim izgaranjem i sl.

Organske tekućine mogu izazvati kemijsku koroziju samo ako su bezvodne jer inače dolazi do elektrokemijske korozije. Najvažnije su bezvodne tekućine nafta i njezini derivati, otapala za odmašćivanje i razrjeđivanje lakova i boja, te otopine neioniziranih tvari u takvim tekućinama. Ta vrsta korozije u tehnici najčešće nastaje djelovanjem maziva na dijelove strojeva[4].



Slika 2-1 Kemijska korozija – oksidacija metala u vrućem zraku[5]

### 2.1.2 Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija metala zbiva se u elektrolitima, tj. u medijima s ionskom vodljivošću. To je redoks proces pri kojemu dolazi do oksidacije atoma metala kao reducensa (donora elektrona) u slobodni kation uz istodobnu redukciju nekog oksidansa, tzv. depolarizatora (akceptora elektrona). Elektrokemijska korozija se odvija u prirodnoj i tehničkoj vodi, u vodenim otopinama kiselina, lužina, soli i drugih tvari, u vlažnom tlu, u sokovima biološkog porijekla, u talinama soli, oksida i hidroksida te u atmosferi. Atmosferska se korozija zbiva uz oborine, odnosno u vodenom adsorbatu ili kondenzatu koji zbog vlažnosti zraka nastaju na površini metala i imaju karakter elektrolita.

Elektrokemijska je korozija vrlo raširena jer je velik broj metalnih predmeta, strojeva i postrojenja izložen vodi ili otopinama, vlažnom tlu ili vlažnoj atmosferi. Posebno teški uvjeti u tom pogledu postoje u energetske i metalurškim postrojenjima te u kemijskoj, prehrambenoj, tekstilnoj i metaloprerađivačkoj industriji[4].

Procesi koji prate elektrokemijsku koroziju:

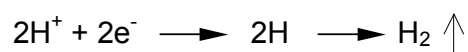
1. **Anodni proces** (oksidacija ili ionizacija metala)

- otapanje metala
- stvaranje elektrona

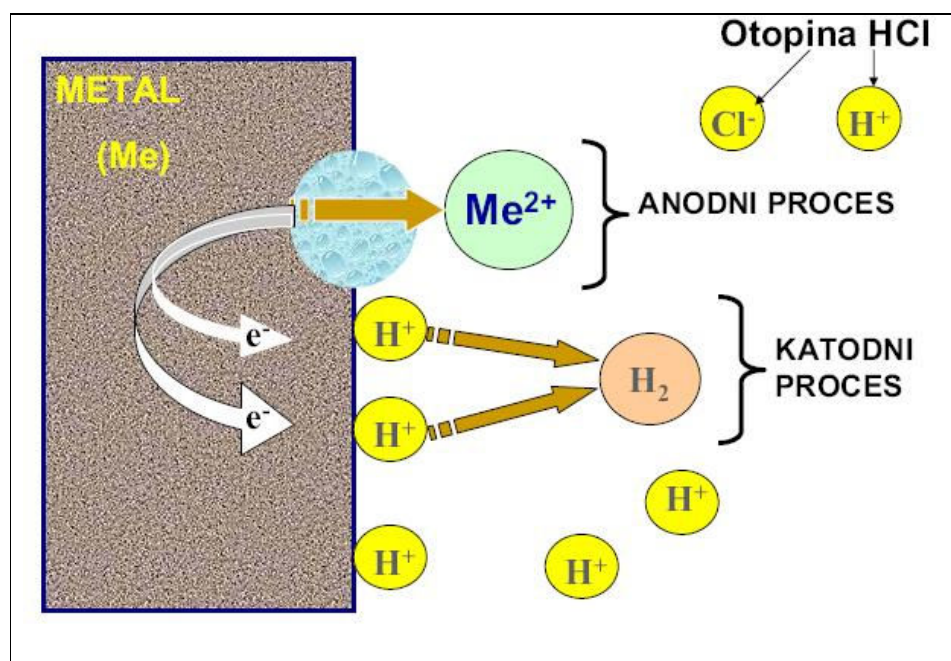
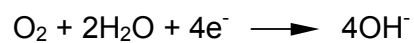


2. **Katodni proces**

- trošenje elektrona
- a) redukcija  $\text{H}^+$  ili vodikova depolarizacija



- b) redukcija  $\text{O}_2$  ili kisikova depolarizacija



Slika 2-2 Elektrokemijska korozija metala u kiseljoj otopini[5]

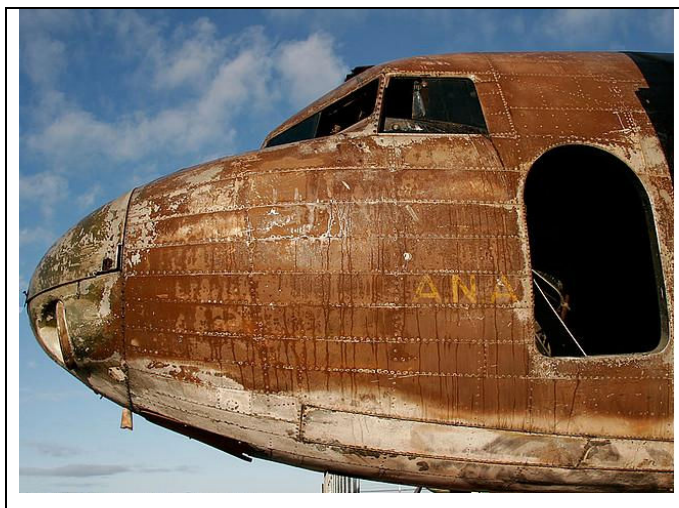
## 2.2. Geometrijska klasifikacija korozije

Prema geometrijskom obliku korozijskog razaranja, korozija se dijeli na opću, lokalnu, selektivnu i interkristalnu[4].

### 2.2.1. Opća korozija

Opća korozija zahvaća čitavu površinu materijala, a može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. Ravnomjerna opća korozija tehnički je najmanje opasna jer se proces može lako pratiti i predvidjeti kada treba određeni dio popraviti ili ga zamijeniti s novim. Neravnomjerna opća korozija je daleko opasnija. Do opće korozije dolazi kada je čitava površina materijala izložena agresivnoj sredini pod približno jednakim uvjetima s obzirom na unutrašnje i vanjske faktore korozije.

Pri odabiru materijala otpornih na opću koroziju, treba uzeti u obzir okolinu u kojoj će se pojedini metal nalaziti te njegovu podložnost općoj koroziji u dotičnom okolišu. Kada god je to moguće, trebalo bi koristiti organske ili metalne prevlake[3,4].



Slika 2-3 Opća korozija[6]

### 2.2.2. Lokalna korozija

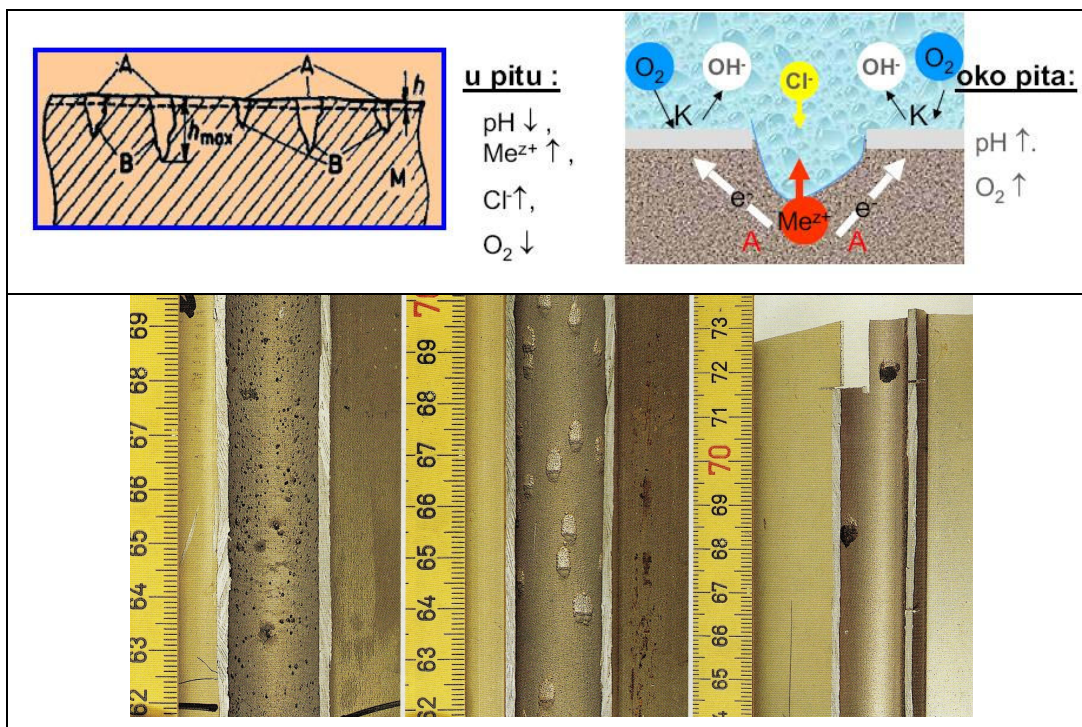
Lokalna korozija napada samo neke dijelove izložene površine, te je ujedno i najrašireniji pojavni oblik korozije. Unutar lokalne korozije glavna podjela je na pjegastu, rupičastu, potpovršinsku i kontaktnu. Pjegasta korozija ograničena je na pojedine veće dijelove površine[3,4].



### 2.2.2.1. Rupičasta korozija

Rupičasta korozija je usko lokalizirani oblik korozije koji se događa kada medij koji uzrokuje koroziju napada materijal i uzrokuje nastajanje malih rupa. To se obično događa na mjestima gdje je zaštitna prevlaka probijena uslijed mehaničkog oštećenja ili kemijske degradacije. Rupičasta korozija je jedan od najopasnijih oblika korozije jer ju je vrlo teško predvidjeti i spriječiti, te relativno teško otkriti, događa se vrlo brzo te prodire u metal bez da uzrokuje vidljivi gubitak mase. Često može doći do iznenadnih havarija mada je gubitak materijala neznatan. To se obično pojavljuje na konstrukcijama koje su mehanički opterećene.

Rupičastu koroziju je teško mjeriti i predvidjeti jer se pojavljuje u obliku mnogih rupica sa različitim dubinama i promjerima, koje se ne pojavljuju pod određenim specifičnim uvjetima. Za stupanj opasnosti od točkaste korozije korisna je mjera tzv. pitting-faktor, tj. omjer dubine prodiranja korozije u materijal na najsnažnijem korozijskom žarištu promatrane plohe i prosječne dubine prodiranja korozije s obzirom na cijelu ploštinu.



Slika 2-4 Rupičasta korozija ("pit" = jamica)[5,7]



Nehrđajući čelici su najpodložniji rupičastoj koroziji među metalima i legurama. Rupice se na nehrđajućem čeliku pojavljuju u morskoj vodi, te u okolišu koji sadrži visoke koncentracije otopina klora i broma. Poliranjem površine nehrđajućeg čelika može se povećati otpornost rupičastoj koroziji. Također izniman učinak na otpornost rupičastoj koroziji postiže se legiranjem sa kromom, molibdenom i niklom.

Ispravan odabir materijala je iznimno važan u prevenciji pojave rupičaste korozije. Jedan od načina provjere odabranog materijala je i testiranje, odnosno izlaganje materijala okolini. Također je moguće postići smanjenje sklonosti rupičastoj koroziji, smanjenjem agresivnosti korozijskog okoliša[3,4].

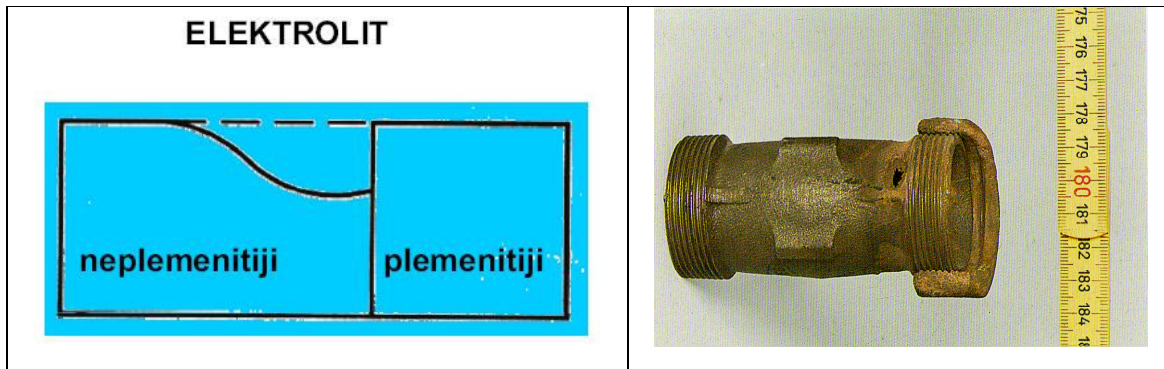
#### **2.2.2.2. Potpovršinska korozija**

Potpovršinska korozija se pojavljuje kada se žarišta rupičaste korozije šire u dubini materijala te ga raslojavaju. Najraširenija je u valjanim metalima u dodiru s morskom vodom i s kiselinama. Na površini materijala pri tome često nastaju mjehuri jer se u njegovoj unutrašnjosti gomilaju čvrsti korozijski produkti kojima je volumen veći od volumena uništenoga materijala[4].

#### **2.2.2.3. Kontaktna korozija**

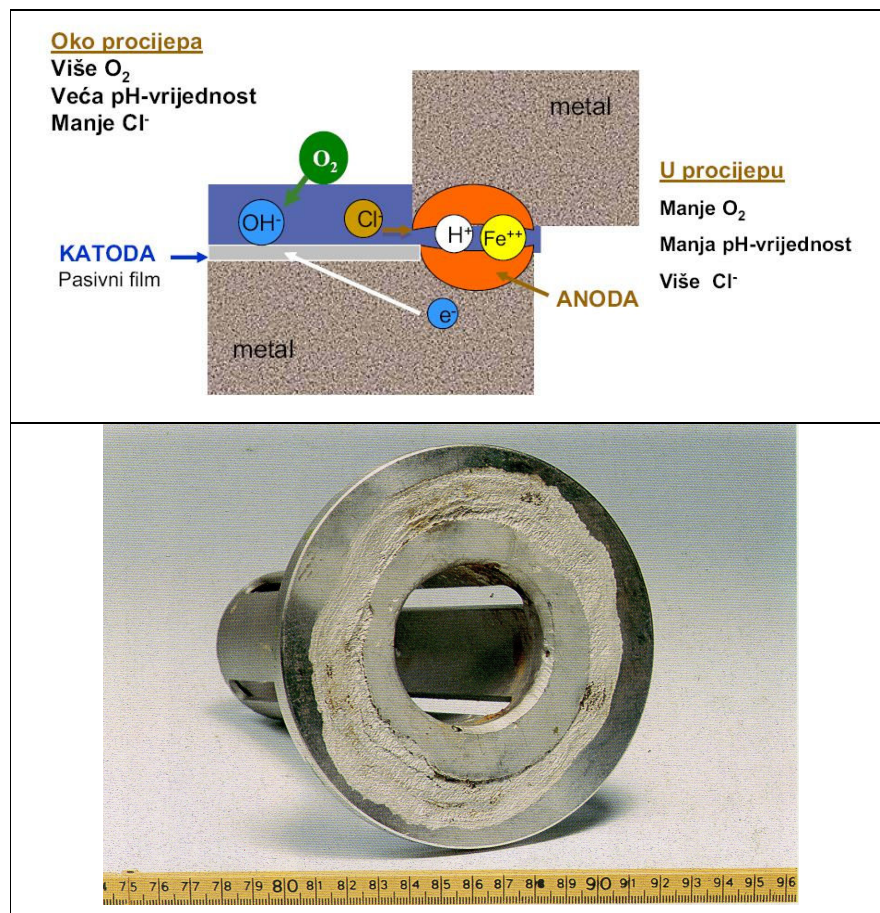
Kontaktnu koroziju možemo podijeliti na galvansku kontaktnu koroziju koja se javlja pri dodiru dvaju različitih metala te na koroziju u procijepu pri dodiru dvaju dijelova od istoga metala ili metala i nemetala.

Galvanska korozija se javlja kada su dva metala sa različitim električnim potencijalima električno povezani, bilo fizičkim kontaktom ili kroz medij koji provodi elektricitet. Sustav koji zadovoljava navedene uvjete formirat će elektrokemijsku ćeliju koja će provoditi elektricitet. Inducirana električna energija tada odvlači elektrone od jednog metala, koji se ponaša kao anoda, suprotan metal, katoda, prima elektrone. Galvanska korozija je najveća u blizini površine gdje su dva metala u kontaktu. Smanjenje sklonosti galvanskoj koroziji postiže se odabirom materijala koji imaju relativno bliske korozijske potencijale, izolacijom kontakta različitih metala, izolacijom anodnog metala od korozivnog okoliša[4].



Slika 2-5 Galvanska kontaktna korozija[5,7]

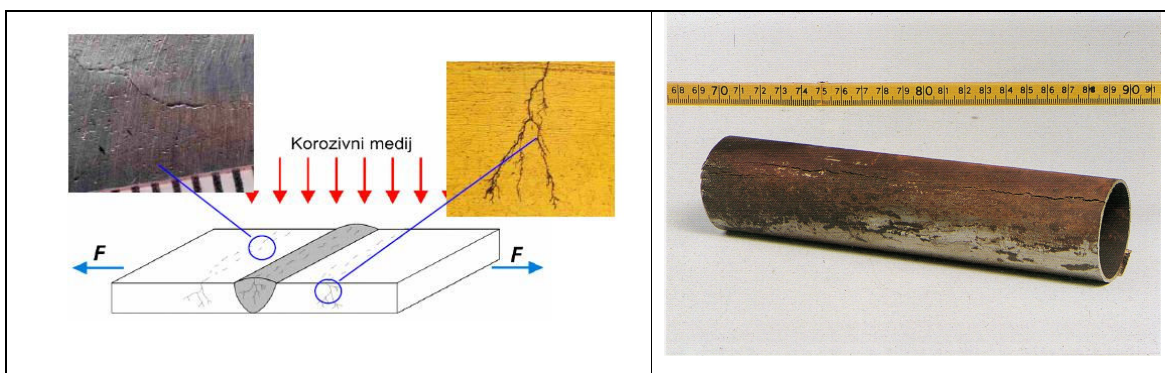
Korozija u procijepu slična je rupičastoj koroziji. Smanjenje sklonosti koroziji u procijepu postiže se izbjegavanjem uskih procijepa pri konstruiranju, izbjegavanjem naslaga, katodnom zaštitom, izbjegavanjem stagnacije medija, omogućavanjem drenaže.



Slika 2-6 Korozija u procijepu[5,7]

#### 2.2.2.4. Napetosna korozija

Napetosna korozija nastupa kada je dio istovremeno izložen djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Ovaj tip korozije nastupit će najčešće na hladno deformiranim lokalitetima, jer tamo zaostaju napetosti. To su npr. hladno deformirana koljena cjevovoda. Također nastaje u okolini zavarenih mjesta gdje su povišena zaostala naprezanja. Napukline napreduju okomito na smjer vlačnog opterećenja, a šire se interkristalno ili transkristalno.



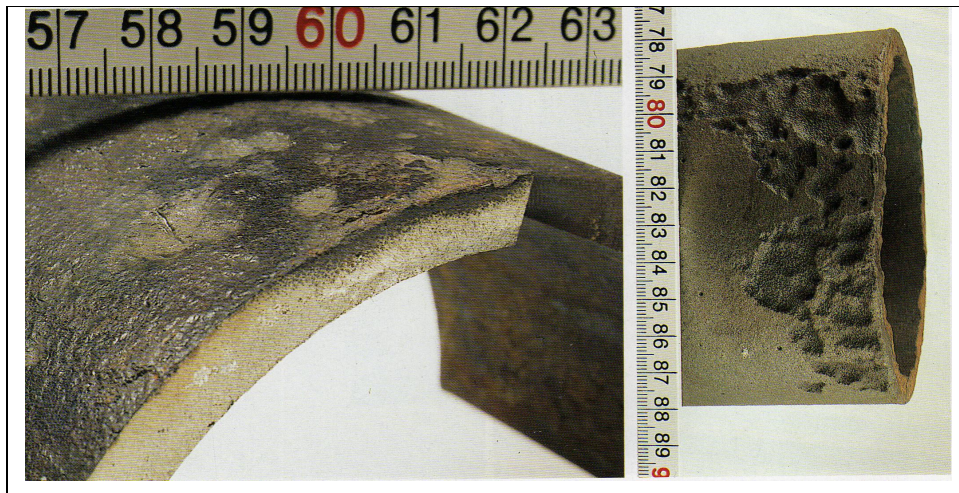
Slika 2-7 Napetosna korozija[5,7]

Smanjenje sklonosti napetosnoj koroziji postiže se sniženjem vlačnog naprezanja toplinskom obradom, konstrukcijskim izmjenama, obradom mlazom sačme i sl. Također korištenjem inhibitora, katodne zaštite, zamjenom metala ili deaktivacijom medija[3,4].

#### 2.2.3. Selektivna korozija

Selektivna korozija je rijedak oblik korozije pri kojoj je napadnut jedan element metalne legure, te nastaje promijenjena struktura. Najčešći oblik selektivne korozije je decinkacija, kada je cink izvučen iz mjedenih legura ili bilo koje druge legure koja sadrži značajan sadržaj cinka. Kod tako novonastalih struktura nije došlo do značajne promjene dimenzija ali je legura oslabljena, porozna i krhka. Selektivna korozija je opasan oblik korozije jer pretvara čvrst i duktilan metal u slab i krhak te podložan lomu. Kako nema velikih promjena u dimenzijama, selektivna korozija može proći neopaženo te izazvati iznenadnu havariju[3,4].

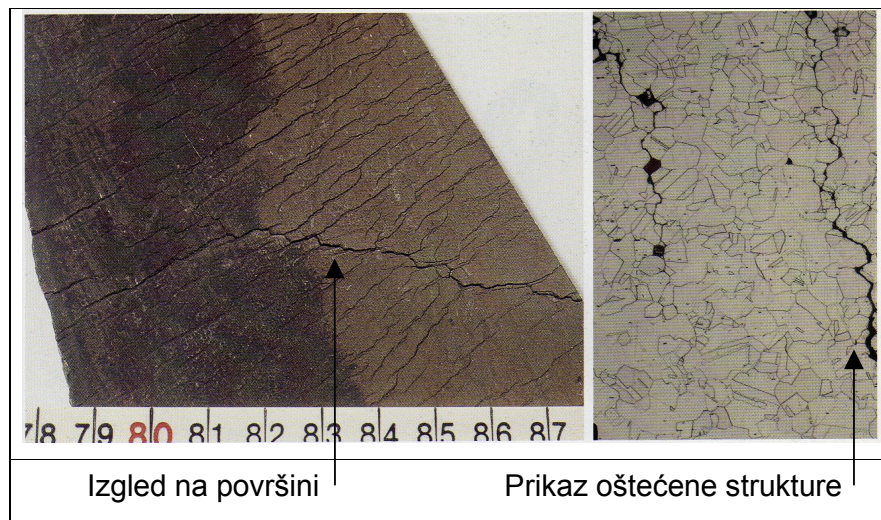




Slika 2-8 Selektivna korozija u obliku grafitizacije sivog lijeva[7]

#### 2.2.4. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija razara materijal na granicama zrna šireći se na taj način u dubinu. Ta vrsta korozije uglavnom se pojavljuje na legurama. Interkristalna korozija je najopasniji oblik korozije jer može dugo ostati neprimjećena a naglo smanjuje čvrstoću i žilavost materijala. Konačna je posljedica interkristalne korozije lom ili čak raspad materijala u zrna. Najčešće zahvaća nehrđajuće čelike, legure na bazi nikla i aluminija[1,2].



Slika 2-9 Interkristalna korozija [7]

## **2.3. Utjecaj različitih okoliša na korozijske procese**

Zrakoplov je tijekom eksploatacije izložen različitim dinamičkim okolišnim uvjetima. Geografski položaj, visina, te vremenski uvjeti također utječu na koroziju zrakoplova i njegovih komponenti[8].

### **2.3.1. Atmosferski uvjeti**

Bez obzira je li zrakoplov u letu ili je prizemljen, konstantno je izložen djelovanju atmosfere, te mora biti u mogućnosti podnijeti ekstremne promjene temperatura, djelovanje različitih zagađenja, vlage, itd. Najštetniji uvjeti s obzirom na opasnost pojave korozije su oni gdje atmosfera sadrži visok udio zagađenja. Zagađenja sadrže korozijski vrlo nepovoljne spojeve kao sumpor-dioksid, amonijak i čestice dima. Pri izboru materijala za zrakoplov, vrlo je bitno voditi računa o atmosferskim uvjetima u kojima će zrakoplov raditi[8].

### **2.3.2. Morski okoliš**

Morski okoliš je najteži okoliš s kojim se zrakoplov može susresti kada je u pitanju zaštita od korozije. Zrakoplovi ratne mornarice su stoga posebno ugroženi jer su gotovo cijeli svoj radni vijek izloženi djelovanju morskoga okoliša. Zrakoplovi na nosačima zrakoplova su izloženi posebno korozivnom okolišu. Izloženi su morskoj atmosferi i uz to često budu izloženi djelovanju morske vode koja je iznimno korozivan medij. Kako je nosač zrakoplova površinski relativno mali, utjecaj ispušnih plinova mlaznih motora treba također uzeti u obzir jer sadrži vrlo korozivne plinove i čestice. Kod mornaričkih zrakoplova koji se nalaze u tropskim uvjetima, pojava korozije je još brža uslijed povišene temperature[8].

### **2.3.3. Pustinjski okoliš**

Pustinjski okoliš može imati iznimno korozivan utjecaj na zrakoplov u relativno niskom letu. Uslijed prašine odnosno krutih čestica u atmosferi, ova vrsta okoliša može utjecati na pojavu erozijske korozije na napadnim rubovima krila te na usisnicima zraka. Uvjeti polijetanja i slijetanja u navedenom okolišu moraju se uzeti u obzir jer lako dođe do oštećenja boje uslijed krutih čestica u zraku i na zemlji. Takva oštećenja mogu dovesti do ubrzane pojave korozije[8].

### 3. KOROZIJSKI POSTOJANI MATERIJALI U ZRAKOPLOVSTVU

Korozijski postojeće aluminijske legure su glavni konstrukcijski materijal koji se primjenjuje u zrakoplovstvu, zbog svoje male gustoće, relativno povoljne cijene, visoke čvrstoće i drugih prikladnih svojstava. Od ostalih metala koji se koriste pri konstrukciji pojedinih zrakoplovnih komponenti bitne su legure titana, nikla i magnezija te posebne vrste visokočvrstih čelika.

#### 3.1. Aluminij i njegove legure

Glavne prednosti aluminija kao konstrukcijskog materijala su njegov povoljan omjer čvrstoće i gustoće, posebno kada se koristi u obliku neke od svojih legura. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge namjene. Legiranjem i precipitacijskim očvršćivanjem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.

Tablica 3-1 Fizikalna i mehanička svojstva aluminija[9]

Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	2700
Talište	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	69000
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> /K	23,8
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	40...180
Istezljivost	%	4...50

Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz upotrebe za prijenos električne energije. Aluminij ima velik afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se osniva široka primjena aluminija[9].

### 3.1.1. Korozijska postojanost aluminija

Aluminij je metal koji žestoko reagira s kisikom i vlažnim zrakom, te je ova jaka reaktivnost koja bi trebala voditi brzom otapanju ustvari temelj stabilnosti aluminija jer stvara tanki zaštitni sloj od oksida i hidratiranih oksida vrlo male elektronske vodljivosti. Ovaj sloj odvaja aluminij od agresivnog medija i koči elektrokemijske reakcije. Debljina sloja stvorena u prirodnoj atmosferi iznosi samo 0.01 do 0.05  $\mu\text{m}$ . Općenito vrijedi da je korozijska otpornost aluminija viša što je metal čišći. Oksidni sloj otežava zavarivanje i lemljenje aluminija što ograničava njegovu upotrebu[4].

Osnovne su značajke korozijskog ponašanja aluminija u elektrolitima sklonost pravom pasiviranju nastajanjem površinskog filma  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i nepostojanost u lužnatim sredinama zbog amfoternog karaktera. Aluminij je redovito pasivan u vlažnoj atmosferi, u slatkoj vodi, u mnogim aeriranim elektrolitima kojima pH – vrijednost leži između 4 i 9. Samo se u prisutnosti aktivnih aniona, kao što su kloridi (npr. u morskoj vodi), odnosno kationa plemenitijih metala, kao što su  $\text{Cu}^{2+}$  i  $\text{Fe}^{3+}$ , na njemu pojavljuje rupičasta korozija čak i u približno neutralnim otopinama. Znatno smanjenje korozijske postojanosti aluminija izaziva dodir sa živom ili otopinama njezinih soli jer se na površini nastalog amalgama ne može formirati pasivni film.

Aluminij je korozijski dovoljno otporan na hladnu sulfatnu kiselinu, na oksidativne kiseline, kakve su npr. nitratna i kromatna kiselina, na mnoge organske kiseline, kakve su primjerice octena kiselina i druge kiseline u živežnim namirnicama. Aluminij korodira u kloridnoj i fluoridnoj kiselini, a donekle i u reduktivnim organskim kiselinama (npr. mravljoj i oksalnoj kiselini).

Kontakt aluminija s drugim metalima u prisutnosti elektrolita često ubrzava njegovu koroziju. To se odnosi prije svega na bakar i bakrene legure premda je u otopinama velike provodnosti opasan i kontakt s nelegiranim crnim metalima. Svi važniji tehnički metali, osim magnezija, cinka i kadmija, redovito su plemenitiji od aluminija. Međutim kontakt s pasivnim nehrđajućim čelicima i s plemenitijim metalima može u nekim elektrolitima pridonijeti pasiviranju aluminija, tj. anodno ga zaštititi. Nasuprot tome, u mnogim kiselim, neutralnim pa čak i slabo lužnatim elektrolitima cink katodno zaštićuje aluminij. Slično djeluje i magnezij i njegove legure, ali pritom često dolazi do tzv. prezasićenosti, tj. do korozije aluminija u otopinama koje uz katodu postaju lužnate. U elektrolitima je najmanje opasan kontakt s kadmijem jer oba metala obično imaju podjednake stacionarne potencijale[4].

Rafinacijom se poboljšava korozijska otpornost aluminija jer elementi pratioci nepovoljno djeluju na njegovu postojanost. Najnepovoljnije na aluminij utječu bakar i željezo. Granica tolerancije na te metale iznosi  $\sim 0.01\%$ , a iznad toga postoji opasnost od interkristalnog izlučivanja plemenitijih faza (npr.  $\text{FeAl}_3$  i  $\text{CuAl}_2$ ) koje u elektrolitima čine vrlo djelotvorne katode.

### 3.1.2. Legure aluminija

Kako je čist aluminij premekan gotovo polovina proizvedenog metala se prerađuje u legure. Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, katkada žilavosti ili livljivosti. Aluminijske legure upotrebljavaju se i u lijevanom i u gnječenom stanju. Mnogima od njih mogu se mehanička svojstva dalje poboljšati precipitacijskim očvrstnućem. Brojne se koriste bez bilo kakve obrade. Često se legira bakrom, magnezijem, silicijem, manganom, kromom, cinkom i drugim metalima i to uglavnom radi povećanja čvrstoće i tvrdoće. Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak i drugih legiranih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure, omogućuju toplinsko očvrstnuće, pospješuju usitnjenje zrna, poboljšavaju rezljivost, itd[9].

Klasifikacija aluminijskih legura napravljena je prema IADS (International Alloy Designation System).

Tablica 3-2 Usporedba korozijske otpornosti aluminijskih legura[8]

Klasifikacija prema IADS	Glavni legirni elementi	Relativna korozijska otpornost
serija		
1000	Nema	Vrlo visoka
2000	Bakar	Niska
3000	Mangan	Visoka
4000	Silicij	Visoka
5000	Magnezij	Vrlo visoka
6000	Magnezij, Silicij	Visoka
7000	Cink	Srednja



**Legure serije 2000** – aluminijske legure serije 2000 sadrže bakar kao glavni legirni element. Ove legure imaju visoku čvrstoću te se uglavnom koriste za strukturu, ali imaju slabiju korozijsku otpornost u usporedbi sa drugim aluminijskim legurama. Stoga, na mjestima gdje se zahtijeva dobra korozijska postojanost, koriste se legure koje ne sadrže bakar ili ga sadrže vrlo malo. Legure ove serije su podložne napetosnoj i selektivnoj koroziji. Legiranje bakrom dovodi do veće pojave opće korozije, rupičaste i interkristalne korozije. Npr. dodatak bakra veći od 0.15% smanjuje otpornost rupičastoj koroziji. Ako se legurama dozvoli duže dozrijevanje, njihova otpornost napetosnoj koroziji se popravila do te mjere da više nisu podložni toj vrsti korozije.

**Legure serije 7000** – cink je glavni legirni elementu u aluminijskim legurama serije 7000, te ima samo mali utjecaj na korozijsku otpornost aluminija. Visoki udio cinka može rezultirati u smanjenoj otpornosti prema intergranularnoj koroziji, napetosnoj i selektivnoj koroziji. Dodatno, prisutnost cinka može izazvati smanjenje otpornosti prema kiselim okolišima, ali može povišiti otpornost prema alkalnim sredinama. Unutar serije aluminijski legura 7000, postoje određene legure koje su posebno podložne napetosnoj koroziji te stoga nisu primjerene za upotrebu u konstrukcijski opterećenim dijelovima[8].

### 3.1.3. Oksidne prevlake na aluminiju

Aluminij ima veliki afinitet prema kisiku, pa se već nekoliko sekundi nakon kemijske ili mehaničke obrade stvara oksidni sloj debljine  $0.01\mu\text{m}$ . Iako tanak, nastali sloj je vrlo kompaktan i čini aluminij postojanim u mnogim korozijskim sredinama, npr. u atmosferi, čistoj vodi i oksidacijskim sredinama. Otpornost aluminija i njegovih legura prema koroziji višestruko se povećava stvaranjem debljeg oksidnog sloja kemijskim ili elektrokemijskim putem.

Kemijski postupci imaju relativno ograničeni primjenu jer dobiveni oksidni slojevi na aluminiju zaostaju po svojim zaštitnim svojstvima za slojevima dobivenim elektrokemijskim putem. Najviše se primjenjuju za složene konstrukcije, čija je oksidacija elektrokemijskim putem otežana.

Elektrokemijski postupak dobivanja oksidnog sloja na aluminiju naziva se anodizacija jer se površina uzorka obrađuje anodno u odgovarajućem elektrolitu. Često korišteni naziv je i eloksiranje prema njemačkom postupku Eloxal.

Postupkom anodizacije na aluminiju dolazi do oksidacije u  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Debljina oksidnog sloja koji nastaje anodizacijom je od 10-20  $\mu\text{m}$  te se sastoji od vrlo tankog kompaktnog podsloja uz metal i poroznog debljeg sloja. Budući da je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  električni izolator, kompaktna prevlaka ne bi mogla rasti pri anodnoj oksidaciji te radni uvjeti moraju istodobno omogućiti odvijanje oksidacije Al u  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i sporije otapanje  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , što osigurava poroznost i električnu vodljivost prevlake smanjujući anodno iskorištenje struje. Dio struje troši se i na izlučivanje kisika te na ionizaciju Al u  $\text{Al}^{3+}$ . Za ukupni proces vrijede izrazi prema Faradayevu zakonu:

$$m = V \cdot \rho = S_k \cdot \delta \cdot \rho = \frac{\eta_k \cdot M \cdot I \cdot t}{z \cdot F}$$

ako se kao veličina karakteristična za galvanski postupak uvede anodna gustoća struje  $j_k = I/S_k$ , prosječna debljina prevlake jednaka je

$$\delta = \frac{\eta_k \cdot M \cdot t}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot j_k$$

$m$  – masa izlučene metalne prevlake, g

$V$  – volumen prevlake,  $\text{cm}^3$

$\rho$  – gustoća prevlake,  $\text{g/cm}^3$

$S_k$  – katodna površina na koju se nanosi prevlaka,  $\text{cm}^2$

$\delta$  – prosječna debljina prevlake, cm

$\eta_k$  – katodno iskorištenje struje, %

$M$  – molarna masa atoma izlučenog metala, g/kmol

$I$  – električna struja, A

$t$  – vrijeme prevlačenja, s

$z$  – broj elektrona

$F$  – Faradayeva konstanta, 96490 C/mol

$j_k = I/S_k$  – katodna gustoća struje,  $\text{A/cm}^2$

Redovito se nakon nekog vremena  $\eta_k$  smanjuje zbog izolacijskog učinka sloja, pa sve više prevladava otapanje  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . zato prevlaka doseže maksimalnu debljinu a kasnije se čak stanjuje. Za razliku od galvanske metalizacije gdje se prevlaka nadograđuje na podlogu, pri anodizaciji Al sloj s približno 2/3 svoje debljine urasta u podlogu, tako da samo preostala 1/3 povećava dimenzije obratka.

Anodizacija se izvodi najčešće u kiselim otopinama na osnovi sulfatne, oksalne ili kromatne kiseline.

Anodizacija sa sumpornom kiselinom je egzoterman proces pa se provodi u kadama obloženim olovom u koje se ugrađuju olovne cijevi za rashladnu vodu. Proces se provodi pri sobnoj temperaturi uz anodnu gustoću struje od 0.5 – 3.0 A/dm<sup>2</sup> u vremenu od 20 do 60 minuta, a kao elektrolit koristi se 15 -25 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Predmeti se spajaju s pozitivnim polom izvora istosmjerne struje, a katoda na kojoj se tijekom anodizacije razvija vodik, je od olova ili aluminijska.

Budući da je elektrokemijski proces stvaranja aluminijskog oksida ireverzibilan proces, pa kod promjene smjera struje ne dolazi do otapanja aluminijskog oksida, za anodizaciju se može koristiti i izmjenična struja. U tom se slučaju predmeti od aluminijske stave na obje elektrode, a anodizacija se zbiva samo na onoj polovici periode, kada je elektroda nabijena pozitivno, te je rast sloja mnogo sporiji nego kod rada s istosmjernom strujom. Radni uvjeti su isti kao i kod istosmjerne struje ali prevlake su tanje, mekše, savitljivije i manje otporne na koroziju.

Debljina nastalog oksidnog sloja proporcionalna je količini protekle struje. Budući da se aluminijski oksid ipak malo kemijski otapa u elektrolitu, debljina sloja je manja nego što odgovara protekloj struji. Kod anodizacije u sumpornoj kiselini istosmjernom strujom iskorištenje je približno 65%.

Velika poroznost anodnog sloja zahtijeva temeljito ispiranje nakon anodizacije. Pritom nije dovoljno ukloniti kiselinu samo s površine predmeta već i iz pora, što je moguće samo difuzijom. Ispiranje se provodi u protočnoj vodi toliko dugo, koliko je trajala anodizacija.

Zbog poroznosti sloja provodi se siliranje. Siliranje začepљуje pore oksidne prevlake bitno povećavajući njezinu zaštitnu moć i sprečavajući ispiranje bojila. Najjednostavnije je vodeno siliranje u kipućej vodi u trajanju od 30 i više minuta. Pri tom procesu oksidni sloj bubri, jer aluminijski oksid vezanjem molekula vode poprima bemitni sastav Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O. Nastale veće molekule zatvaraju pore, pa stoga tek siliranjem sloj postiže maksimalna antikorozivna svojstva.

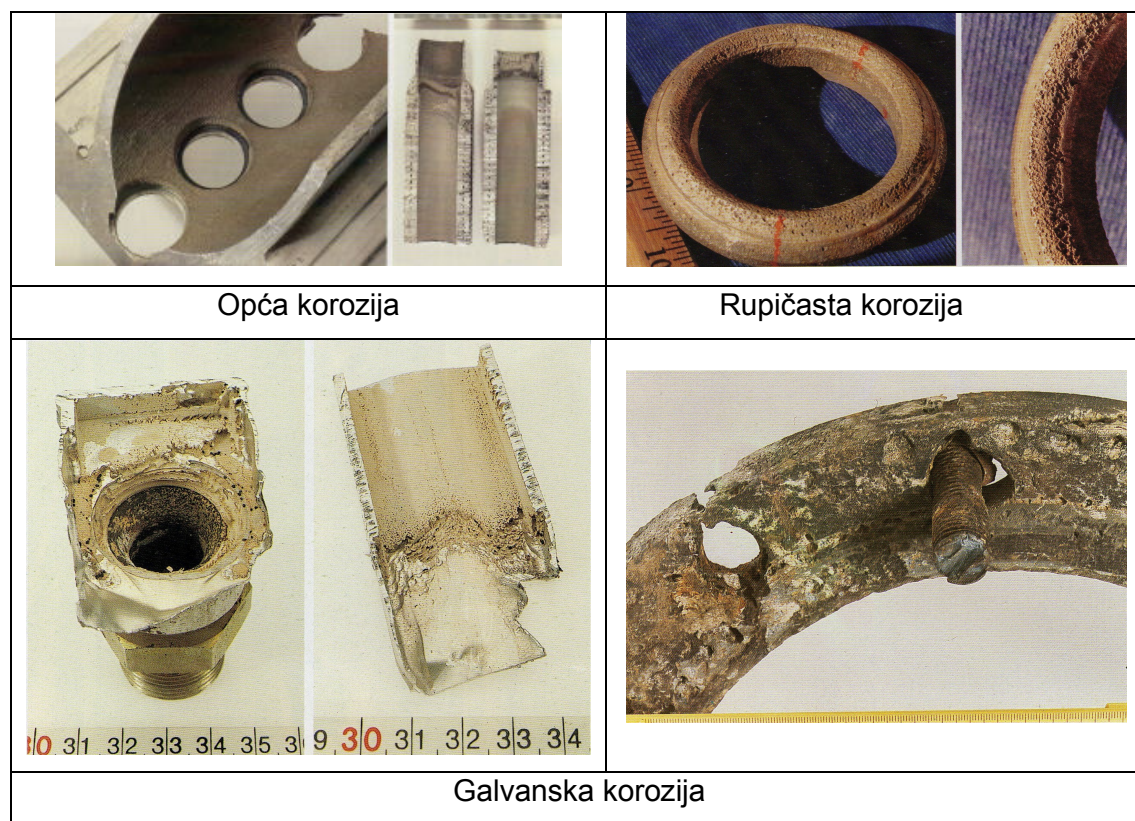
Nakon siliranja predmeti se suše i eventualno nježno poliraju, kako bi se uklonio praškasti talog koji zaostaje na površini obradaka siliranih u vrućim otopinama.

Anodizacija aluminijske je skup postupak ali omogućuje mnogo širu primjenu aluminijske i aluminijskih legura zbog zaštitnog i dekorativnog učinka. Slojevi oksida su tvrdi i otporni na trošenje trenjem, ali su krhki te stoga pucaju okomito na podlogu pri savijanju. Nakon pojave pukotine sloj se ne ljušti ali pukotine mogu napredovati i kroz metal[1,13].

### 3.1.4. Otpornost aluminija prema različitim pojavnim korozijskim oblicima

Iako aluminij i njegove legure općenito imaju dobru otpornost na različite oblike korozije, ovisno o glavnim legirnim elementima, ipak su podložne pojedinim korozijskim oblicima uključujući galvansku, rupičastu, napetosnu, interkristalnu[8].

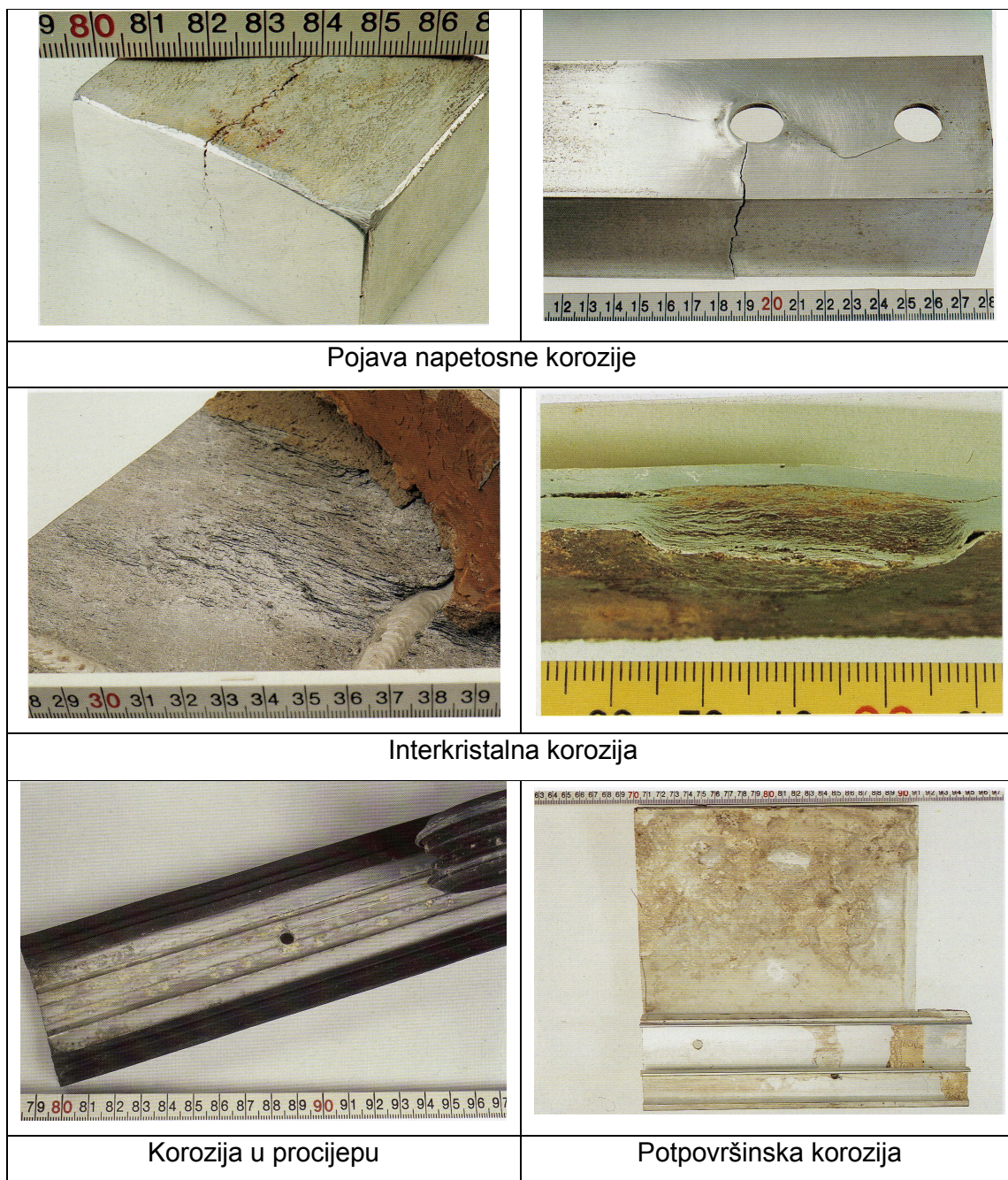
**Galvanska korozija** - aluminij, osobito kada je sparen sa čelikom, je podložan galvanskoj koroziji. Aluminij je relativno neplemenit metal. Ponašanje aluminija je anodno te će doći do pojave korozije kada je u kontaktu sa drugim metalima koji su plemenitiji od njega.



Slika 3-1 Pojavni korozijski oblici na aluminiju i njegovim legurama[7]

**Rupičasta korozija** - jedan od najčešćih korozijskih oblika koji se pojavljuju na aluminiju. Okolišni uvjeti u kojima se nalaze kloridi, predstavljaju jednu od najvećih korozijskih prijetnji, te se rupičasta korozija pojavljuje u morskim okolišnim uvjetima. Morska voda koja struji velikom brzinom u odnosu na aluminijsku leguru je izrazito korozivan okoliš, jer sprečava ponovno nastajanje zaštitnog oksidnog sloja te omogućuje nastanak rupičaste korozije.





Slika 3-2 Pojavni korozijski oblici na aluminiju i njegovim legurama[7]

**Napetosna korozija** - dodatak bakra, magnezija i cinka u dovoljnim količinama može dovesti do napetosne korozije u aluminijским legurama. Napetosna korozija ovisi o okolišu kojemu je materijal izložen. Aluminijска legura izložena morskom okolišu ima povećanu podložnost pojavi napetosne korozije. Povećanje pH u kloridnom okolišu ima za posljedicu smanjenje podložnosti napetosnoj koroziji.

**Interkristalna korozija** - nehomogenosti unutar strukture legure su glavni uzroci pojavi interkristalne korozije kod aluminijskih legura. Legure sa visokim udjelom bakra podložne su ovoj vrsti korozije.

### 3.1.5. Primjena aluminija i njegovih legura u zrakoplovstvu

Aluminijske legure su najčešće korišteni konstrukcijski materijal za sustave i komponente zrakoplova. Koriste se za oplata krila i trupa, ramenjače, kućišta motora, zakovice te mnoge druge komponente.

Lijevane aluminijske legure su rjeđe korištene u zrakoplovnim konstrukcijama od kovanih, te se koriste za rotore, komponente pumpi i kompresora, kotače zrakoplova i druge komponente. Vrlo su otporne na koroziju, posebno na napetosnu te imaju dobru zavarljivost. Kovane aluminijske legure su iznimno raširene u primjeni na zrakoplovnim konstrukcijama. Od najznačajnijih legura za zrakoplove su one serija 2000 i 7000[8].

#### 3.1.5.1. Legure aluminija korištene na zrakoplovu Canadair CL-415

Osnovne aluminijske legure koje se upotrebljavaju za konstrukciju i popravke na zrakoplovu CL-415 su 2024 i 7075.

Tablica 3-3 Kemijski sastav aluminijskih legura 2024 i 7075

Elementi (%)	Legure	
	2024	7075
Aluminij	90.7 – 94.7	87.1 – 91.4
Krom	0.1 max	0.18 – 0.28
Bakar	3.8 – 4.9	1.2 – 2
Željezo	0.5 max	0.5 max
Magnezij	1.2 – 1.8	2.1 – 2.9
Mangan	0.3 – 0.9	0.3 max
Silicij	0.5 max	0.4 max
Cink	0.25 max	5.1 – 6.1
Titan	0.15 max	0.2 max
Ostatak	0.15 max	0.15 max

Toplinski obradiva legura 2024, koristi se za općenite primjene gdje je potrebna visoka čvrstoća, dobra korozijska postojanost te dobra obradljivost. Legura 7075 se koristi u slučajevima gdje je potrebna dobra korozijska postojanost ali veća čvrstoća od legure 2024. Legura 7075 nije obradljiva kao legura 2024[10].

### 3.2. Titan i njegove legure

Titan i njegove legure su zbog svojih mehaničkih svojstava vrlo prikladan materijal za zrakoplovne konstrukcije. S obzirom na mehanička svojstva, od kojih su najvažnija visoka čvrstoća uz malu gustoću, titan se može usporediti s čelikom ali se dobiva teže od čelika. Titan je u odnosu na ostale uobičajene konstrukcijske materijale relativno skup metal, te se zbog toga koristi samo za određene komponente. Povišenjem temperature mehanička svojstva titana pogoršavaju se relativno sporo.

Tablica 3-4 Fizikalna i mehanička svojstva titana[9]

Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	4500
Talište	°C	1670
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	110000
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> /K	9
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	250...700
Istezljivost	%	>10

#### 3.2.1. Korozijska postojanost titana

Od svih tehničkih metala titan se najlakše elektrokemijski pasivizira što dolazi do izražaja u njegovoj odličnoj korozijskoj otpornosti prema mnogim agresivnim sredinama: u atmosferi, u slatkoj i morskoj vodi, u otopinama mnogih soli, u razrijeđenim otopinama anorganskih kiselina, u lužinama. Titan korodira u neoksidativnim anorganskim kiselinama srednjih koncentracija, osobito pri povišenim temperaturama, u vrelim koncentriranim otopinama organskih kiselina reduktivnog karaktera, u vrućim koncentriranim otopinama jakih lužina, u talinama klorida, fluorida, hidroksida itd. U dimećoj nitratnoj kiselini trenjem dolazi do korozijske eksplozije[4].

### 3.2.2. Legure titana

Da bi se postigla željena mehanička svojstva, titan se najčešće legira aluminijem, kromom, kositrom, vanadijem, paladijem i molibdenom.

Općenito, titanove legure koje su razvijene zbog karakteristika visoke čvrstoće i dobrih svojstava pri otpornosti puzanju, imaju slabiju otpornost prema koroziji od komercijalno čistog titana, ali postoje legirni elementi koji mogu poboljšati otpornost prema koroziji. U odnosu na legure razvijene za zrakoplovstvo, samo je ograničena količina truda uložena u razvoj titanovih legura za korozijski postojanu primjenu. Jedna od najuspješnijih dodataka je paladij, koji se dodaje tehnički čistom titanu. On ne samo da povećava otpornost prema reducirajućim kiselinama kao sumpornoj, klorovodičnoj i fosfornoj nego i povisuje kritičnu temperaturu pri kojoj može nastati pukotinska korozija u morskoj vodi. Princip dodavanja paladija proširuje se i na neke legure visoke čvrstoće kako bi se kombinirala korozijska postojanost sa dobrim mehaničkim svojstvima. Korozijski postoje legure koje su razvijene tokom godina uključuju Ti-0.8%Ni-0.3%Mo kao moguća zamjena za legure titana i paladija i Ti-6%Al-7%Nb koji se koristi u kirurgiji kao materijal za implantate[11].

Neke od titanovih legura proizvedenih za određenu primjenu su[11]:

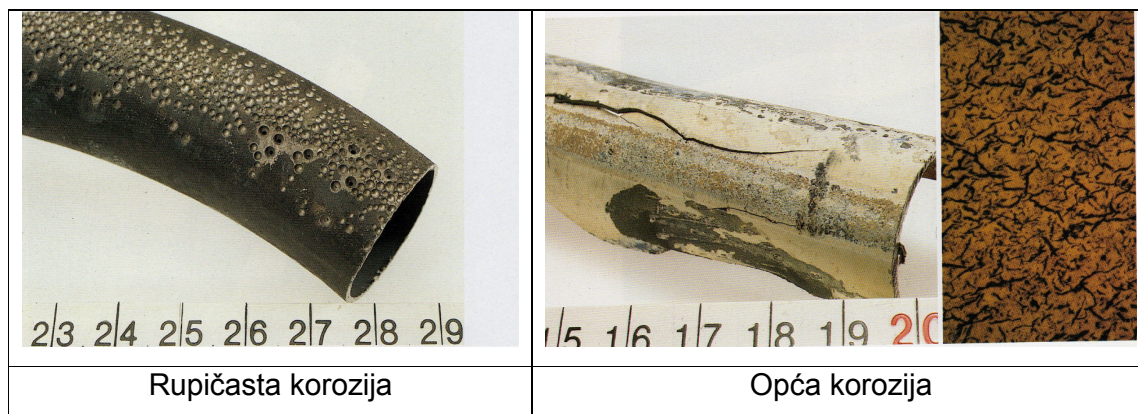
1. Legure Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (uobičajeno zvana Ti-17) i Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo za visoku čvrstoću pri povišenim temperaturama.
2. Legure Ti-6242S, IMI 829, i Ti-6242 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) za otpornost puzanju.
3. Legure Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo i Ti-6Al-4V-ELI za otpornost napetosnoj koroziji u slanim otopinama i visoku otpornost pojavi pukotina.
4. Legura Ti-5Al-2,5Sn je proizvedena zbog svoje zavarljivosti
5. Legure Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-4V i Ti-10V-2Fe-3Al zbog visoke čvrstoće pri niskim do umjerenim temperaturama.

### 3.2.3. Otpornost titana prema različitim pojavnim korozijskim oblicima

Titan i njegove legure pokazuju izvrsnu korozijsku postojanost. Titan je generalno otporan na oksidaciju, galvansku koroziju, napetosnu koroziju, zamor uslijed korozije i erozijsku koroziju.



**Rupičasta i pukotinska korozija** - najčešće se pojavljuju u kloridnoj, sulfatnoj, mravljoj i oksalnoj kiselini srednjih koncentracija. Pukotine uslijed napetosne korozije nastaju u vrelim koncentriranim otopinama  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$  i  $\text{CaCl}_2$ , u kloridnoj kiselini, u dimećoj nitratnoj kiselini, u talinama klorida[4].



Slika 3-3 Pojavni korozijski oblici na titanu i njegovim legurama[7]

**Kontaktna korozija** - titan je visoko korozijski postojan te je često plemenitiji metal u galvanskom članku. Kontakt sa manje plemenitim metalima, kao što su Mg, Zn ili Al, može dovesti do galvanske korozije manje plemenitog metala i izazvati nepoželjna oštećenja konstrukcije. Galvansku koroziju se može umanjiti pravilnim konstruiranjem kao što je smanjenje omjera dodirnih površina katoda/anoda, električkom izolacijom titanovih komponenti, katodnom zaštitom ili inhibitorima korozije[12].

Kontakt titana s drugim metalima u elektrolitima izaziva slične posljedice kao i kontakt s nehrđajućim čelicima. Na taj se način osobito ubrzava korozija magnezija i njegovih legura u slanoj vodi.

**Napetosna korozija** - iako su titan i njegove legure općenito otporne na koroziju u mnogim medijima, uključujući vodene otopine klorida, napetosna korozija tehnički čistog titana i njegovih legura može se pojaviti u nekoliko specifičnih okoliša.

Prva uočena pojava napetosne korozije na titanu, bila je u dimećoj nitratnoj kiselini. Pukotine su se pojavile interkristalno. Pojava je uočena samo u suhim uvjetima, prisustvo malih količina vode potpuno je zaustavilo reakciju. Sve titanove legura su podložne napetosnoj koroziji u ovim uvjetima.

Metanol je, uz nitratnu kiselinu, jedini medij koji uzrokuje napetosnu koroziju tehnički čistog titana i njegovih legura. Lom ponovno nastaje od pukotine koja se pojavljuje interkristalno te je pojava vjerojatnija ako se u alkoholu nalaze ioni broma, klora ili joda. I u ovom slučaju će i malene količine vode spriječiti reakciju[3].

#### **3.2.4. Primjena titana i njegovih legura u zrakoplovstvu**

Inženjeri pronalaze u titanu i njegovim legurama, metal čiji omjer gustoće i čvrstoće ga čini izuzetno povoljnim za upotrebu u zrakoplovstvu. Titan nalazi sve širu primjenu te sve češće zamjenjuje aluminij i nehrđajući čelik. Aluminij brzo gubi mehanička svojstva sa povišenjem temperature, za razliku od titana koji zadržava čvrstoću i pri temperaturama do 426°C. Prednost titana u odnosu na čelik je smanjenje mase zrakoplova bez gubitka čvrstoće. Smanjenje mase zrakoplova uz povećanje radne temperature pogonskih motora, doveli su do povećanja korisnog tereta zrakoplova, kao i do poboljšanih manevarskih sposobnosti i doleta. Najčešća primjena u zrakoplovstvu je za komponente mlaznih motora kao što su kompresorske lopatice, turbinski diskovi, kućišta, itd[14].

##### **3.2.4.1. Legure titana korištene na zrakoplovu Canadair CL-415**

Na zrakoplovu CL-415 korišteni su i tehnički čisti titan i titanove legure. Tehnički čisti titan je niže čvrstoće i korozijski otporniji od titanovih legura. Koristi se u strukturama gdje čvrstoća nije prioritet. Titanova legura koja je korištena je Ti-8Mn. To je legura srednje čvrstoće, zadovoljavajućih svojstava i pri povišenim temperaturama, stabilna do oko 315°C i dobrih oblikovljivih karakteristika[10].

### 3.3. Nikal i njegove legure

Nikal je tehnički značajan metal zbog njegovih dobrih fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava kao i otpornosti na koroziju. Otporan je na atmosferske utjecaje, postojan u morskoj vodi, neoksidirajućim hladnim kiselinama, lužnatim otopinama i rastaljenim jakim lužinama.

Tablica 3-5 Fizikalna i mehanička svojstva nikla[9]

Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	8900
Talište	°C	1453
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	210000
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> /K	13
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	380...500
Istezljivost	%	2...60

#### 3.3.1. Korozijska postojanost nikla

U vrućim oksidativnim plinovima nikal je dosta postojan sve do 1000°C mada se njegova mehanička svojstva naglo pogoršavaju iznad 800°C. Povećanjem sadržaja vodene pare i SO<sub>2</sub> snižava se postojanost u takvim plinovima, ali i tada nastaje tamni površinski sloj NiO koji koči daljnju oksidaciju. U H<sub>2</sub>S nikal brzo korodira već iznad 100°C jer nastali crni sloj NiS nema dobra zaštitna svojstva. Ako oksidativni plinovi sadrže H<sub>2</sub>S, korozija je na temperaturama >300°C vrlo brza zato što nastaju lako taljive eutektičke smjese oksida i sulfida nikla. U takvim okolnostima katkad dolazi i do intergranularnog razaranja. Ista se pojava također zapaža pri izmjeničnom izlaganju vrućim oksidativnim i reduktivnim plinovima.

Primarni produkt korozije nikla u elektrolitima redovito je Ni<sup>2+</sup>. Premda je nikal skloniji pravoj pasivnosti od željeza, on ipak korodira u mnogim oksidativnim elektrolitima.

Atmosferska korozija nikla redovito je vrlo spora, a očituje se gubitkom sjaja i polaganim tamnjenjem metala. Tek nakon vrlo dugog razdoblja, i to obično u vlažnoj industrijskoj atmosferi, pojavljuje se zelenkasti sloj patine koji se pretežno sastoji od niklenog bazičnog sulfata (smjese hidroksida i sulfata).

U otopinama neoksidativnih soli, nikal je uglavnom postojan, ali u određenim slučajevima (npr. morskoj vodi), dolazi do pojave rupičaste korozije.

Nikal je postojan u slabo aeriranim razrijeđenim neoksidativnim kiselinama kao što su  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  i organske kiseline. Brzina korozije osim aeracijom i povećanjem koncentracije raste i zagrijavanjem. U vreloj kloridnoj kiselini, nikal je postojan samo ako je koncentracija  $\text{HCl}$  manja od 0.5%. U nitratnoj i nitritnoj kiselini, kao i u drugim oksidativnim kiselinama, on je potpuno nepostojan.

Nikal je vrlo otporan na jake lužine do vrelišta, pa čak i na njihove taline. U otopinama amonijaka, koncentracije  $\text{NH}_3 < 1\%$ , on nije postojan, pogotovo uz dobru aeraciju jer korozijom nastaju kompleksni ioni  $\text{Ni}(\text{NH}_3)_6^{2+}$  dajući lako topive soli.

U vrelim koncentriranim jakim lužinama ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ) na komercijalnom niklu s  $> 0.05\%\text{C}$  pojavljuju se pukotine uslijed napetosne korozije. Ta se pojava može izbjeći ako se zagrijavanjem na  $875^\circ\text{C}$  kroz 5 minuta popuste napetosti. Rafinacijom se sadržaj ugljika snižava na  $\sim 0.02\%$ , čime se potpuno sprečava spomenuti razorni proces.

Kontakt s niklom u elektrolitima ubrzava koroziju aluminija, a u manjoj mjeri također pospješuje koroziju ugljičnog čelika i sivog lijeva[4].

### 3.3.2. Legure nikla

Niklove legure su poznate po njihovoj otpornosti prema koroziji i otpornosti pri visokim temperaturama pa ih se ubraja u tzv. superlegure, izvanrednih svojstava ali i visoke cijene. Superlegure su višekomponentni sustavi na temelju nikla i kobalta s visokim udjelom kroma i manjim udjelima molibdena, volframa, titana i aluminija[4].

Njihova se mehanička svojstva postižu otapanjem legirnih elemenata u kristalima mješancima matrice i precipitacijom intermetalnih spojeva i/ili karbida raspoređenih u austenitnoj matrici. Na očvrsnuće kristalima mješancima najjače djeluje kobalt, ali tek iznad 16%. Na očvrsnuće precipitacijskim mehanizmom djeluju: molibden stvaranjem  $\text{Mo}_6\text{C}$ ; krom stvaranjem  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ; aluminij i titan stvaranjem koherentnih  $\gamma'$  – faza ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) i nekoherentnih  $\eta$  - faza ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ); niobij, tantal i vanadij stvaranjem karbida[9].

Legure otporne na koroziju i visoke temperature, a koje su u tehničkoj primjeni, podijeljene su prema legirnim elementima u skupine s odgovarajućim trgovačkim oznakama, ovisno o proizvođaču[9].

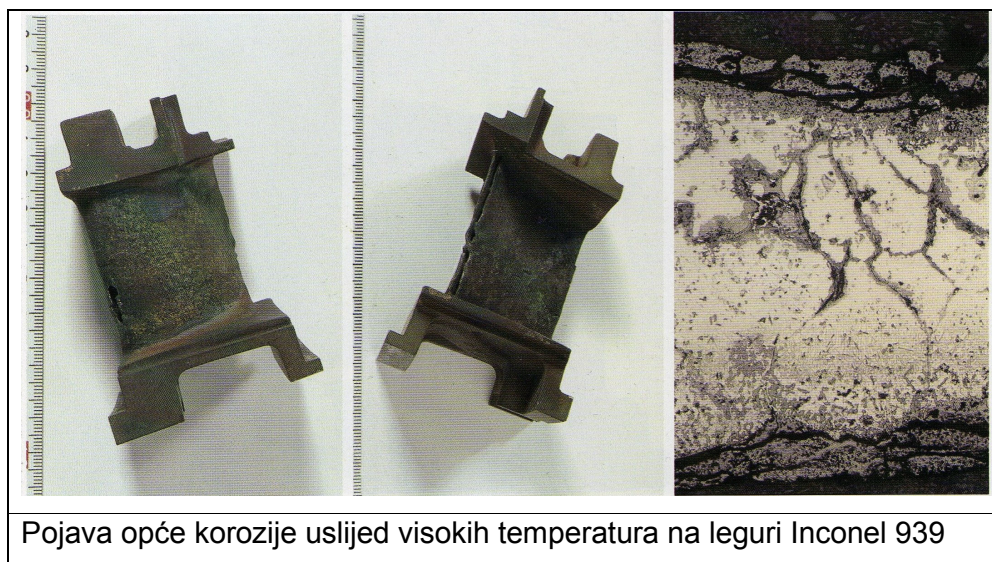
Tablica 3-6 Podjela niklovih legura[9]

Skupina			Trgovački naziv (proizvođač)
1.	Nikal – bakar		Monel (Inco Alloys)
	Nikal – krom		Nimonic (Inco Alloys)
2.	Nikal – molibden – krom		Hastelloy (Haynes)
3.	Nikal – krom – željezo		Inconel (Inco Alloys)
	Nikal – željezo – krom		Incoloy (Inco Alloys)
4.	Nikal – krom +	Aluminij - titan	Različite vrste legura pod skupnim imenom "superlegure"
		Kobalt – volfram – željezo	
		Ugljik	

### 3.3.3. Otpornost nikla prema različitim pojavnim korozijskim oblicima

Nikal i njegove legure imaju izvrsnu otpornost na koroziju. U pojedinim uvjetima, mogu biti podložni određenim oblicima korozije[8].

**Opća korozija** - nikal i njegove legure su vrlo otporne na opću koroziju u različitim okolišnim uvjetima. Kako je nikal relativno plemenit metal, legure sa visokim udjelom nikla, tipično pružaju dobru otpornost prema općoj koroziji.



Slika 3-4 Korozijska oštećenja na dijelovima od legura nikla[7]



**Galvanska korozija** - kako je nikal relativno plemenit metal a također i prilično katodan u usporedbi sa većinom drugih metala, vrlo je malo podložan galvanskoj koroziji. Ukoliko je sparen sa plemenitijim metalom može doći do pojave galvanske korozije.

**Rupičasta i korozija u procijepu** - nikal je donekle podložan rupičastoj i koroziji u procijepu u morskom i drugim okolišima. Površinske nečistoće mogu uzrokovati rupičastu koroziju, jer mogu djelovati kao jezgre pojave korozije. Korozija u procijepu se može pojaviti posebno u dijelovima gdje se zadržava morska voda.



Slika 3-5 Pojavni korozijski oblici na niklu i njegovim legurama[7]

**Interkristalna korozija** - nikal ima dobru otpornost prema interkristalnoj koroziji iako pojedine legure nikla sa lošom toplinskom obradom, mogu biti podložne pojavi ove vrste korozije. Općenito, veći udio nikla odgovara većoj otpornosti pojave interkristalne korozije. U okolišu sa sumporom, legure nikla imaju povišenu podložnost interkristalnoj koroziji.

**Napetosna korozija** - legure na bazi nikla se koriste u slučajevima kada se austenitni nehrđajući čelici ne mogu upotrijebiti zbog svoje podložnosti napetosnoj koroziji. Za legure na bazi nikla se smatralo da su uglavnom otporne na napetosnu koroziju osim u određenim okolišnim uvjetima, ali je njihova proširena primjena i na povišenim temperaturama dovela do toga da se napetosna korozija mora uzeti u obzir.

#### **3.3.4. Primjena nikla i njegovih legura u zrakoplovstvu**

Zrakoplovna i svemirska industrija oslanjaju se na legure nikla zbog njihove sposobnosti održavanja čvrstoće i otpornosti zamoru materijala pri visokim temperaturama i tijekom velikih temperaturnih promjena. Čvrste i lagane, estetskog izgleda, legure nikla su izvrstan izbor za dijelove i komponente potrebne u zrakoplovnoj industriji.

Superlegura koja se najviše upotrebljava danas u zrakoplovnoj industriji je legura 718 (52.5% nikal, 19% krom, 5,1% niobij, 3% molibden). To je precipitacijski očvrstljiva legura sa izvrsnim mehaničkim svojstvima pri povišenim temperaturama kao i pri kriogenim temperaturama. Prikladna je za temperature sve do oko 700°C, ima izvrsnu čvrstoću u granicama od -250 do 705°C. Legura ima izvrsnu zavarljivost i korozijsku postojanost.

Legure nikla se koriste za komponente koje rade u ekstremnim uvjetima. Najčešća primjena je na dijelove mlaznih i raketnih motora, rotorske lopatice, komoru izgaranja, itd[14].

### 3.4. Magnezij i njegove legure

Magnezij ima od svih konstrukcijskih metala najmanju gustoću pa je prikladan za primjenu u zrakoplovstvu. Njegova primjena ograničena je lošim mehaničkim svojstvima i nepostojanosti u mnogim sredinama, te se u praksi mnogo češće primjenjuju njegove legure zbog povećane čvrstoće u odnosu na čisti magnezij.

Tablica 3-7 Fizikalna i mehanička svojstva magnezija[9]

Gustoća	Kg/m <sup>3</sup>	1740
Talište	°C	649
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	45100
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> /K	25
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	80...180
Istezljivost	%	1...12

#### 3.4.1. Korozijska postojanost magnezija

U vrućim oksidativnim plinovima magnezij naglo oksidira, a u obliku folije ili žice može čak i planuti. Izotermni je tok te oksidacije linearan jer nastali produkt koroziije, MgO, nema zaštitnih svojstava. Suprotno tome, magnezij je postojan u mnogim suhim neoksidativnim plinovima.

Slično titanu, magnezij brzo korodira u bezvodnom metanolu, a nešto sporije u benzinu koji sadrži organske spojeve olova antidetonatorskog djelovanja.

Kao najneplemenitiji konstrukcijski metal, magnezij redovito korodira uz vodikovu depolarizaciju u slabo lužnatim i neutralnim, a pogotovo u kiselim elektrolitima. Vodikova se depolarizacija također odvija u prirodnoj slatkoj i slanoj vodi, osobito pri povišenim temperaturama. Magnezij vrlo brzo korodira u vodenim otopinama soli teških metala jer njihovi kationi djeluju kao depolarizatori. Od aniona, proces koroziije ubrzavaju kloridi, bromidi, jodidi, klorati, hipoklorati, sulfati itd. U vlažnom zraku i slanoj vodi može doći i do pojave pukotina zbog napetosne koroziije.

Magnezij je postojan u fluoridnoj kiselini, koncentracije HF>2%, jer se prekriva slojem netopljiva MgF<sub>2</sub>. koroziija je spora i u kromatnoj kiselini zbog nastajanja slabo topljivih magnezij-kromata.



U lužnatim je otopinama magnezij otporan na koroziju jer na njegovoj površini nastaje netopivi sloj  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Iznad  $60^\circ\text{C}$  ipak počinje proces korozije uslijed povećane topljivosti nastalog hidroksida.

Kontaktom sa gotovo svim drugim metalima u elektrolitima korozija se magnezija ubrzava. Za tehnički čisti metal praktički je bezopasan samo kontakt sa aluminijem ili s AlMg legurama, premda čak i u tom slučaju tragovi željeza, bakra i nikla u magneziju ubrzavaju proces korozije[4].

### 3.4.2. Legure magnezija

Legiranjem magnezija ne poboljšava se njegova korozijska postojanost te u pojedinim slučajevima može čak dovesti do ozbiljnog povećanja podložnosti prema koroziji. Glavni legirni elementi kod komercijalnih legura su aluminij, cink, mangan, torij, cirkonij i cer, ponekad i bakar i silicij. Iako se ne koriste pojedinačno kao legirni elementi svaki od njih ima određeni utjecaj. Aluminij (do 10%) povećava granicu razvlačenja, čvrstoću i tvrdoću, ali može uzrokovati ljevačku poroznost; cink (do 6%) povećava čvrstoću i povisuje oblikovljivost; mangan (1...2%) poboljšava otpornost na koroziju, ali može smanjiti dinamičku izdržljivost; cer i torij povisuju statičku izdržljivost do  $220^\circ\text{C}$ , odnosno  $300^\circ\text{C}$ . Torij poboljšava i livljivost i zavarljivost te smanjuje poroznost odljevaka. Cirkonij povisuje čvrstoću[9].

Primjese teških metala redovito pogoršavaju korozijsko djelovanje magnezija, te postoje granice tolerancije na sadržaj sastojaka kao što su željezo, bakar, nikel, itd.

### 3.4.3. Otpornost magnezija prema različitim pojavnim korozijskim oblicima

Magnezij i njegove legure mogu biti iznimno podložne različitim oblicima korozije, uključujući i opću koroziju. Preventivne i zaštitne mjere su gotovo uvijek potrebne pri upotrebi materijala sa magnezijem[8].

**Opća korozija** - magnezijeve legure imaju najveću prosječnu brzinu opće korozije od legura korištenih u zrakoplovstvu. Pri izlaganju, dolazi do stvaranja zaštitnog oksidnog sloja, koji se lako degradira u raznim okolišnim uvjetima i kemijskim spojevima. Metode korozivne zaštite se gotovo uvijek koriste kod magnezijevih legura. Magnezijeve legure se ne koriste kod gibajućih dijelova gdje može lako doći do oštećenja zaštitnog sloja.

**Galvanska korozija** - većina metala je plemenitija u odnosu na magnezij te se ponašaju katodno. Aluminijske legure su najbliže magneziju u galvanskom članku, iako pojedine aluminijske legure mogu prouzročiti pojavu galvanske korozije u dodiru sa magnezijevim legurama. Bakar, nikal i željezo izazivaju ozbiljnu galvansku koroziju u dodiru s magnezijevim legurama, te stoga aluminijske legure koje ne sadrže navedene elemente su poželjne pri upotrebi u dodiru sa magnezijevim legurama.



Slika 3-6 Galvanska korozija magnezija[7]

**Napetosna korozija** - podložnost magnezija napetosnoj koroziji je općenito veća u legurama koje sadrže aluminij i cink. Dodatak aluminija, iznad 2.5%, povećava podložnost nastajanju pukotina uslijed napetosne korozije. Dodatak cinka također povisuje podložnost napetosnoj koroziji ali ne kao aluminij. Legure magnezija bez aluminija i cinka, najotpornije su s obzirom na napetosnu koroziju.

#### 3.4.4. Primjena magnezija i njegovih legura u zrakoplovstvu

Glavno područje primjene magnezija je metalurgija, posebno izrada lakih legura. Najznačajnije od tih legura sadrže magnezij s dodacima aluminija, cinka i mangana a upotrebljavaju se u automobilske i zrakoplovnoj industriji. U zrakoplovnoj industriji legure magnezija imaju najširu primjenu u proizvodnji kućišta, te se koriste za kućišta motora, reduktora i prijenosa. Prikladni su zbog svoje male gustoće i relativno dobrih mehaničkih svojstava te dobre livljivosti[14].

## 4. METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE U ZRAKOPLOVSTVU

Priprema konstrukcije zrakoplova za antikorozivnu zaštitu započinje pri samom procesu projektiranja zrakoplova. Kvalitetna priprema mora uključivati:

- odabir odgovarajućeg konstrukcijskog materijala te mora uzeti u obzir mogućnost pojave galvanskog članka pri kontaktu različitih materijala;
- primjenu zaštitnih prevlaka;
- konstruiranje drenažnih otvora;
- primjenu brtvila;
- korištenje inhibitora;
- kvalitetan pristup za održavanje;
- primjenu učinkovitih programa zaštite od korozije.

### 4.1. Odabir materijala

Odabir optimalnog materijala za potrebnu namjenu je bitan korak u dugogodišnjoj zaštiti od korozije. Aluminij je materijal čija je upotreba u zrakoplovstvu najraširenija, ali su aluminij i niskolegirani čelici najpodložniji koroziji od materijala korištenih u zrakoplovstvu. Za vrlo korozivan okoliš uzima se u obzir korištenje titanovih legura. Nehrdajući čelici se koriste kada je to moguće, ali visoko opterećeni dijelovi konstrukcije, poput podvozja, proizvedeni su od visokočvrstog niskolegiranog čelika. Legure magnezija više nisu u upotrebi za primarne dijelove strukture[15].

### 4.2. Odabir zaštitnih prevlaka

Najpraktičnije i najučinkovitije sredstvo zaštite od korozije je nanošenje zaštitnih prevlaka na elemente konstrukcija. Za aluminijske legure, sustav zaštitnih prevlaka se obično sastoji od primarnog premaza nanijetog na aluminij. Posljednjih godina postalo je uobičajeno ne korištenje postupka siliranja anodiziranog zaštitnog sloja. Iako ovo smanjuje korozijsku postojanost anodiziranog sloja, postiže se bolje prihvaćanje primarnog premaza na nesiliranu površinu. Rezultat je manja vjerojatnost otkidanja nanijetog zaštitnog sloja tijekom eksploatacije i održavanja.

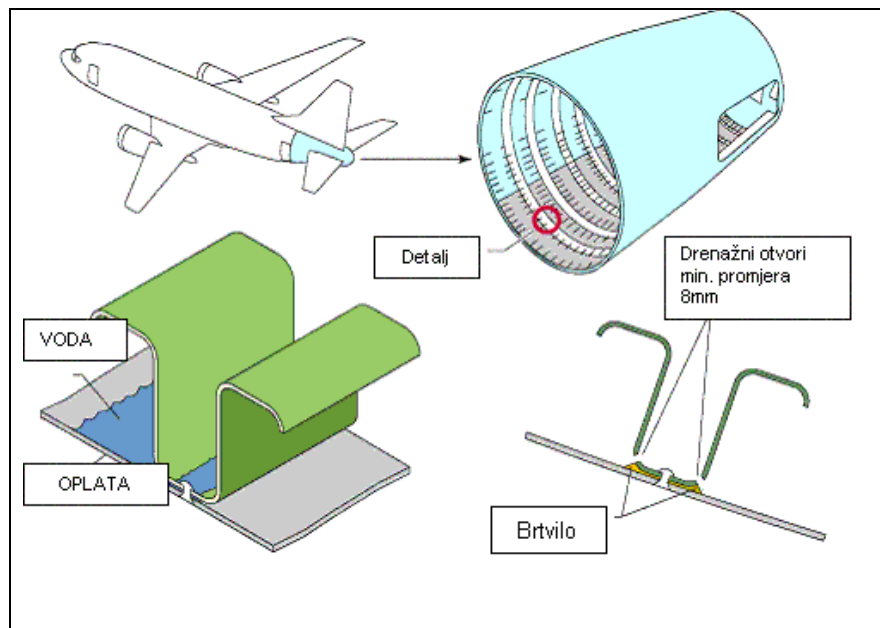
Za konstrukcijske komponente od niskolegiranog čelika, sustav zaštitnih prevlaka se sastoji od nanese metalne kadmijeve prevlake i od organskog primarnog

premaza. Dijelovi od nehrđajućeg čelika su također zaštićeni kadmijevom prevlakom i primarnim premazom ukoliko su u dodiru sa aluminijem ili legiranim čelikom. Razlog je sprečavanje pojave galvanske korozije na aluminiju i legiranom čelikom. Zbog istoga razloga se dijelovi od titana premazuju primarnim premazom kada su u dodiru sa aluminijem ili legiranim čelikom[15].

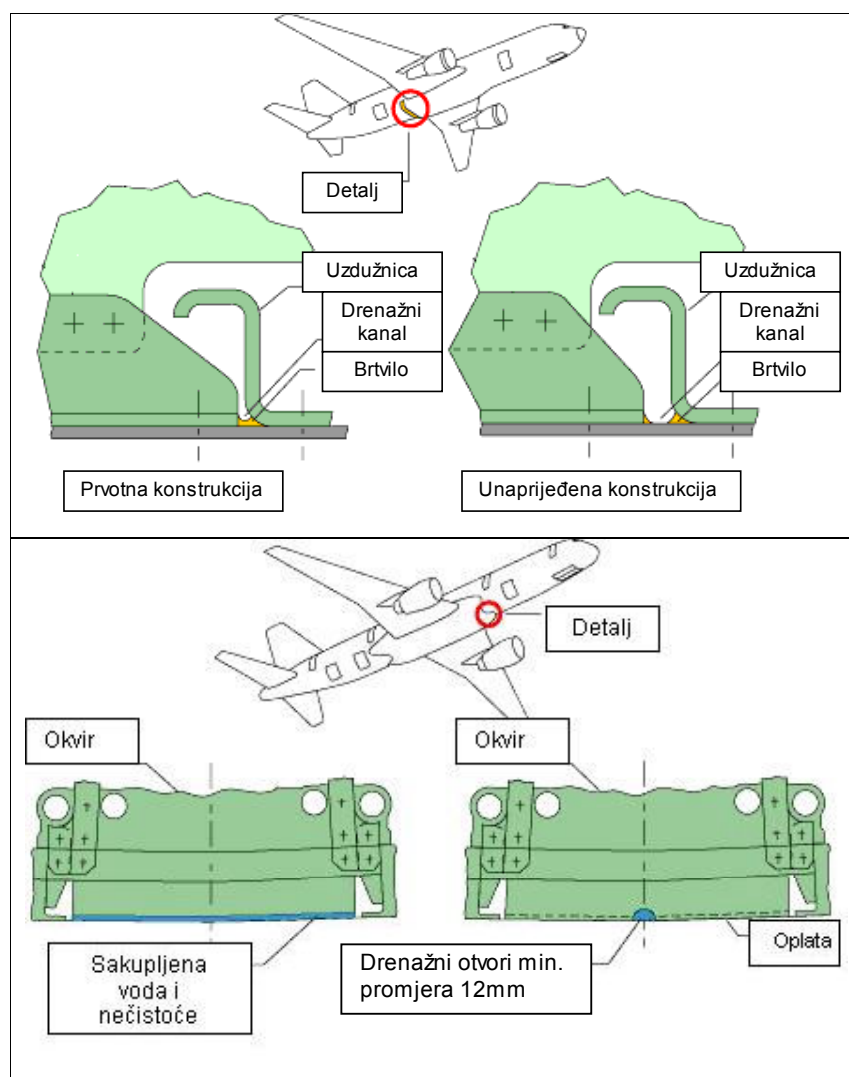
### 4.3. Drenaža

Učinkovita drenaža cijele strukture je od vitalne važnosti radi sprečavanja zadržavanja tekućina u procijepima. Cijeli donji dio strukture zrakoplova je premrežen kanalima kojima se tekućine dovode do drenažnih otvora[15].

Primjeri rješenja drenaže kompanije Boeing, dani su na slijedećoj slici:



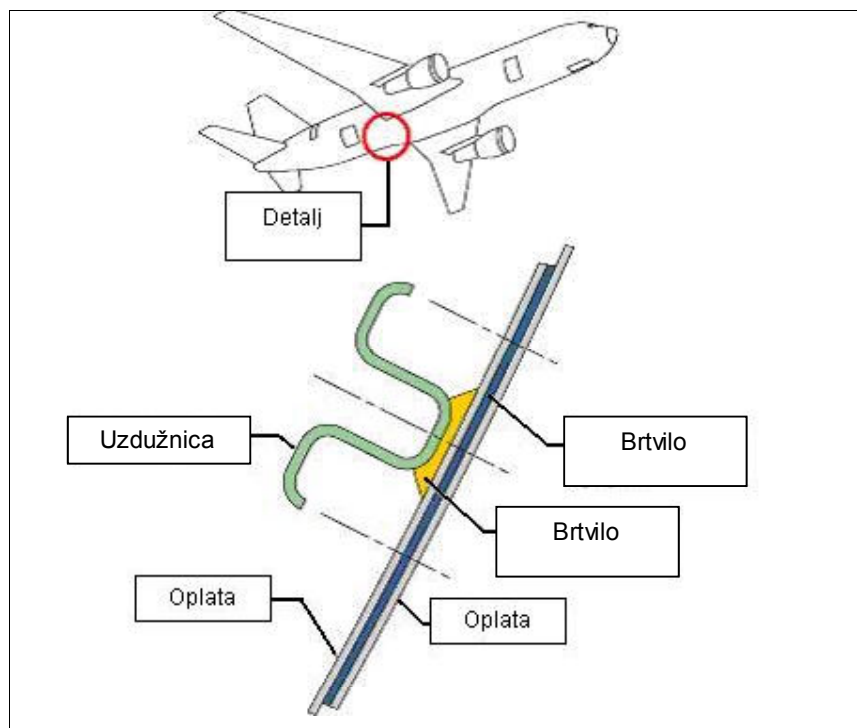
Slika 4-1 Drenaža donjeg dijela strukture zrakoplova[15]



Slika 4-2 Drenaža donjeg dijela strukture zrakoplova[15]

#### 4.4. Brtvila

Radi sprečavanja pojave korozije u procijepu, učinkovitim se pokazala upotreba polisulfidnih brtvila. Brtvilo se nanosi na područja gdje postoji opasnost od ulaska tekućina u procijepe, uglavnom na mjestima spoja dvaju dijelova poput spoja oplata - uzdužnica ili mjesta gdje je oplata dvostruka. Spojni elementi i ležajevi se također zaštićuju brtvilom.



Slika 4-3 Upotreba brtvila[15]

#### 4.5. Upotreba inhibitora

Zaštita metala obradom korozivne sredine može se provesti na dva načina:

- uklanjanjem aktivatora korozije iz agresivne sredine;
- uvođenjem inhibitora korozije u agresivnu sredinu.

U konstrukcijama često se nalaze dijelovi koji su teško pristupačni ili čak potpuno nepristupačni za kvalitetnu i dugotrajnu zaštitu od korozije. Jedno od mogućih tehničkih rješenja predstavlja primjena inhibitora korozije. Inhibitori se koriste za usporavanje korozije metala u elektrolitima i vlažnim plinovima, a katkad i u ugljikovodičnim kapljevina (npr. mazivima). Pravilan izbor inhibitora je značajan te pri tom odabiru treba voditi računa o metalu koji se štiti i uvjetima u kojima se on nalazi. U znanstvenoj i tehničkoj literaturi o koroziji metala nalaze se opisi brojnih kemijskih spojeva koji imaju inhibitorska svojstva od kojih se vrlo mali broj stvarno upotrebljava u praktičnim sustavima. Razlog tome je činjenica da u praksi poželjna svojstva nekog inhibitora nisu samo zaštita metala nego oni moraju zadovoljiti i druge zahtjeve poput cijene, raspoloživosti, toksičnosti i drugih čimbenika.

Inhibitori korozije se definiraju kao tvari koje dodane u malim količinama u agresivni medij mogu u velikoj mjeri smanjiti brzinu korozije metala. Većinom se primjena inhibitora odnosi na[13]:

- atmosfersku koroziju
- vodene sustave, i to na dva glavna tipa
  - o prirodne vode, vodovodne, industrijske vode (pH = 5 - 9)
  - o vodene otopine kiselina koje se upotrebljavaju u procesima čišćenja metala u industriji (dekapiranje)
- primarnu i sekundarnu tehnologiju nafte

Primjena inhibitora u zrakoplovstvu koristi se kao dodatna zaštita uz prevlake, hermetike i drenažu. Inhibitori se redovito nanose tijekom eksploatacije zrakoplova, posebno na mjesta poznata po problemima sa korozijom te na teško dostupna mjesta (npr. unutrašnjost krila, repa, upravljačkih površina).

#### **4.6. Pristup za održavanje**

Sve strukture zrakoplova trebaju biti konstruirane tako da omogućuju lagani pristup prilikom održavanja i kontrole eventualno nastalih korozijskih oštećenja. Kako se korozijska inspekcija mora vršiti redovito, lagani pristup što većem broju komponenti je jedan od primarnih zadataka konstruiranja te predstavlja prvi korak u borbi protiv korozije[15].

#### **4.7. Programi zaštite od korozije**

Svaki proizvođač za svoje zrakoplove propisuje detaljne tehnološke upute u okviru programa održavanja te zaštite od korozije. Praćenje propisanih procedura nužno je za kvalitetnu kontrolu korozije i osiguravanje strukturnog integriteta zrakoplova te sigurnosti tijekom eksploatacije. Praćenje programa zaštite od korozije će minimizirati broj radnih sati utrošenih na održavanje i popravke vezane uz koroziju[15]

## **5. KOROZIJSKA OŠTEĆENJA ZRAKOPLOVNIH KONSTRUKCIJA**

Korozijnska oštećenja metalnih komponenti zrakoplova mogu biti iznimno teška za predvidjeti zbog složenih dinamičkih uvjeta tijekom eksploatacije kojima je izložen zrakoplov u svom radnom vijeku. Za razliku od statičnih konstrukcija koje su konstantno izložene istom okolišu, sustavi i komponente zrakoplova su konstantno izložene različitim okolišima, uključujući i promjenjive atmosferske uvjete te promjenjive uvjete rada svih komponenti. Zrakoplov leti velikim brzinama, zahtijeva veliki potisak te samim time radi u uvjetima ekstremno brzih promjena temperature, naprezanja i vibracija. Trošenje, zamor materijala i naprezanja u kombinaciji sa agresivnim okolišem mogu ubrzati pojavu korozije. Geografski položaj, visina, te vremenski uvjeti također utječu na koroziju zrakoplova i njegovih komponenti[8].

### **5.1. Glavne komponente zrakoplova podložne koroziji**

Pojedini dijelovi zrakoplova su izloženiji agresivnijem okolišu od drugih, te time i različiti dijelovi imaju i različite probleme s korozijom. Dapače, određeni dijelovi zrakoplova imaju kronične probleme sa korozijom te zahtijevaju posebno prilagođene programe održavanja i provjera. Dijelovi koji su izrazito podložni koroziji su preklopni spojevi; žice, konektori i druge elektroničke komponente; spojni elementi i otvori; podvozje; komponente motora[8].

#### **5.1.1. Oplata zrakoplova**

Oplata zrakoplova ima tendenciju korodirati nakon dužeg perioda izloženosti korozivnom okolišu. Korozija oplata obično započinje u blizini spojnih elemenata i provrta, preklopnih spojeva ili gdje je došlo do oštećenja zaštitne prevlake odnosno gdje nije bila niti nanijeta.

#### **5.1.2. Preklopni spojevi i spojni elementi**

Preklopni spojevi koji imaju pukotine su posebno podložni koroziji ako se ne poduzmu preventivne mjere. Svaki dio konstrukcije kao i spojevi, gdje postoji razmak između komponenti u koji može ući vlaga i ostati zarobljena, iznimno je podložan koroziji. Upotreba brtvila i sustava zaštite od vlage je potrebna za prevenciju pojave ove vrste korozije.



Spojni elementi i provrti su poznati kao glavni izvor problema sa korozijom. Zakovice u dodiru sa oplatom zrakoplova mogu biti podložni galvanskoj kontaktnoj koroziji ako su metali dovoljno različiti i ako nemaju odgovarajuće prevlake. Spojni elementi bi trebali biti katodni u odnosu na materijal s kojim se spajaju, što će dodatno umanjiti efekte galvanske korozije. Uz galvansku koroziju, spojni elementi mogu biti podložni i napetosnoj koroziji zbog konstantnog naprezanja i opterećenja. Također, treba uzeti u obzir materijale koji nisu podložni vodikovoj bolesti. Spojevi koji su kritični za integritet konstrukcije zrakoplova trebaju koristiti materijale koji vrlo otporni korozivnom okolišu u kojemu će se nalaziti. Provrti su također iznimno podložni zamoru uslijed korozije i napetosnoj koroziji. Dijelovi konstrukcija koji su spojeni zakovicama iznimno su podložni pojavi eksfolijacije odnosno pojavi listanja. Dva načina sprečavanja ove vrste korozije je upotreba odgovarajućeg metala i hermetika na materijalu zakovica[8].

#### **5.1.3. Električni sustavi**

Električni sustavi koji se sastoje od žica, konektora i kontakata, poznati su po problemima sa korozijom. Vлага ili vlažan okoliš mogu dovesti do korozije metalnih dijelova u električnom sustavu. Mala količina korozije može imati značajne posljedice na ovaj sustav te ga onemogućiti u ispravnom radu. Zbog toga je izuzetno važno spriječiti vlagu da dođe u doticaj sa ovim sustavom.

#### **5.1.4. Konstrukcijske komponente**

Dijelovi konstrukcije koji podnose naprezanja i izložene su korozivnom okolišu, podložni su pojavi napetosne korozije. Uslijed pojave i brzog napredovanja napetosne konstrukcije može doći do puknuća određenog dijela konstrukcije i havarije cijelog zrakoplova. Također, na spojevima koji se sastoje od različitih materijala, može doći do ubrzane korozije. Odabir materijala koji imaju visoku korозиjsku postojanost je izuzetno bitan ukoliko se želi da konstrukcijski dio nosi značajno opterećenje i izdrži visoka naprezanja.

#### **5.1.5. Zrakoplovni motori**

Zrakoplovni motori sadrže posebno korozivan okoliš, gdje su visoke temperature, korozivne tekućine i plinovi konstantno prisutni u radu. Sustav pogonske grupe zrakoplova stoga je posebno poznat po podložnosti koroziji, posebno

visokotemperaturnoj koroziji. Ovi sustavi rade u uvjetima ekstremno visokih temperatura koje mogu dosegnuti i do 1200°C. U komponentama mlaznih motora, korozija i lom mogu ubrzano nastupiti ukoliko dođe do pomaka i neželjenog dodira između komponenti motora koji trenjem stvaraju dodatnu toplinu. Ove ekstremno visoke temperature uzrokuju ubrzanu oksidaciju komponenata uključujući i one od titana. Zbog toga precizno konstruiranje dijelova i odabir materijala, su izuzetno bitni kako bi se spriječila pojava korozije. Usisnik motora poznat je po podložnosti koroziji zbog oštećenja površine metala i prevlaka uslijed krutih čestica u zraku i kiše[8].

#### **5.1.6. Komponente helikoptera**

Helikopteri se sastoje od komponenata koje su jedinstvene te kao takve imaju vlastite specifične probleme sa korozijom. Dijelovi poput glave rotora, lopatica glavnog rotora i lopatica repnog rotora su direktno izloženi atmosferskim uvjetima te je pojava korozije ubrzana u odnosu na unutarnje dijelove. Napadni rub lopatica rotora je podložan oštećenjima uslijed krutih čestica u zraku poput prašine, pijeska i kiše te samim time opasnost od pojave korozije na oštećenim dijelovima je povećana.

#### **5.1.7. Ostali sustavi zrakoplova**

Razni otvori i odvodi u donjem području strukture zrakoplova, u kojima može doći do skupljanja raznog otpada kao što su ulje, voda, prljavština te razne krhotine i otpaci, su vrlo podložni pojavi korozije. Ukoliko se ne vrše redoviti pregledi i čišćenja, takva područja su iznimno podložna pojavi opće i napetosne korozije.

Mehanički sustavi upravljanja, poput pokretačkih elemenata kontrolnih površina, mogu korodirati uslijed dodira sa drugim metalima ili oštećenih zaštitnih prevlaka. Područje podvozja je ugroženo raznim krhotinama koje se mogu nalaziti na području polijetanja i slijetanja. U području akumulatora može doći do istjecanja akumulatorske tekućine što predstavlja iznimno korozivan okoliš. Rezervoari goriva su vrlo vlažan okoliš te i njima treba pridati posebnu pozornost. Površine zrakoplova koje se nalaze u području ispušnih plinova motora, su podložne pojavi korozije uslijed iznimno korozivnog okoliša koji predstavljaju ispušni plinovi[8].

## 5.2. Oblici korozijskih oštećenja zrakoplovnih konstrukcija

Napetosa korozija, zamor uslijed korozije i vodikova bolest su neki od najopasnijih korozijskih oblika na zrakoplovu zbog mogućnosti pojave pukotina te naposljetku i havarije cijelog zrakoplova. Ostali korozijski oblici mogu također biti izuzetno opasni ako se ne primijete na vrijeme i ne poduzmu se odgovarajuće zaštitne mjere. U nastavku su prikazani karakteristični primjeri različitih korozijskih oštećenja na zrakoplovima[8].

### 5.2.1. Opća korozija

Opća korozija na zrakoplovu je najlakše uočljiva i ne predstavlja osobitu opasnost ukoliko se poduzmu odgovarajuće preventivne mjere. Najčešće se javlja kao posljedica krivo nanijetih ili tijekom eksploatacije oštećenih zaštitnih prevlaka.



Slika 5-1 Upravljač zrakoplova[7]

### 5.2.2. Korozija u procijepu

Korozija u procijepu je jedan od najčešćih korozijskih oblika koji se pojavljuju na zrakoplovu. Do njezine pojave dolazi kada kapljevina bude zarobljena u malim pukotinama i procijepima između susjednih komponenti. Za sprečavanje pojave potrebno je primijeniti zaštitne prevlake, brtvila i drenažu tekućine iz komponenti.



- dio kormila visine proizveden od **aluminijske legure 7075 (Al-Zn-Mg)**
- pojava korozije u preklopnom spoju
- dio zamijenjen nakon 11 godina upotrebe
- uzrok pojavi korozije bila je slana atmosfera
- spoj nije bio hermetički zatvoren te bi korištenje brtvila spriječilo ulazak vlage unutar spoja

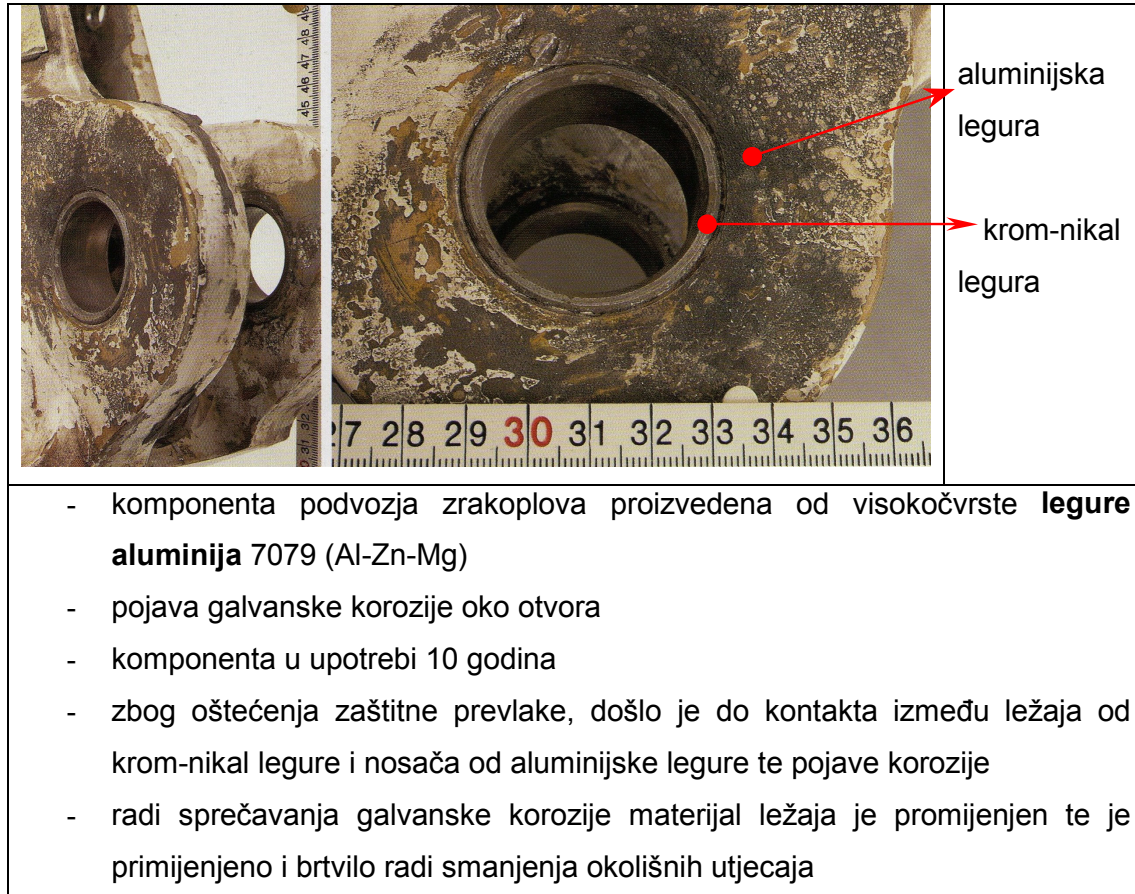
Slika 5-2 Kormilo visine patrolnog zrakoplova ratne mornarice[7]

### 5.2.3. Galvanska korozija

Komponente koje imaju u sebi dva različita metala u dodiru, zahtijevaju posebnu pozornost i pripremu zbog mogućnosti pojave galvanske korozije. Galvanska korozija kod zrakoplova uobičajeno se pojavljuje na dodiru čelika i aluminija, titana i aluminija te titana i čelika. Uobičajeno mjesto nalaska galvanske korozije je između spojnih elemenata i susjednog metala. Ukoliko su od različitih metala, bolje je odabrati da metal spojnog elementa bude malo više katodan od susjednog metala.



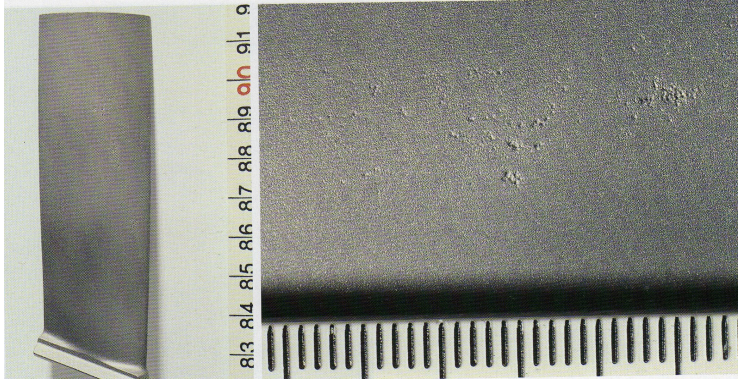
Galvansku koroziju je moguće izbjeći sprečavajući dodir dvaju različitih metala. Ako je kontakt različitih metala nužan, treba odabrati metale sa što manjom razlikom potencijala.



Slika 5-3 Komponenta podvozja zrakoplova[7]

#### 5.2.4. Rupičasta korozija

Rupičasta korozija se češće pojavljuje na zrakoplovima koji se nalaze u uvjetima morske atmosfere zbog koncentracije iona klorida u takvom okolišu. Pojava rupičaste korozije je često uzrokovana oštećenjima na zaštitnim prevlakama. Dio gdje je oštećena prevlaka je iznimno podložan napadu korozije. To se može dogoditi tijekom proizvodnje ili održavanja zrakoplova, ili se zaštitna prevlaka može istrošiti tijekom vremena. Rupičasta korozija se također može pojaviti ukoliko se u metalu nalaze nečistoće koje imaju veću podložnost pojavi korozije od osnovnog metala ili legure.



- kompresorska lopatica proizvedena od **nehrđajućeg čelika**
- pojava rupičaste korozije uslijed napada klorida
- dio zamijenjen nakon 3000 sati upotrebe
- uzrok pojavi je morska atmosfera odnosno kloridi nastali iz morske soli; lopatice sa rupicama dubljim od 250  $\mu\text{m}$  se odbacuju zbog opasnosti od nastanka pukotina uslijed zamora materijala
- prevencija je redovito pranje radi uklanjanja morske soli ili upotreba materijala otpornijeg na koroziju, poput titanovih ili niklovih legura

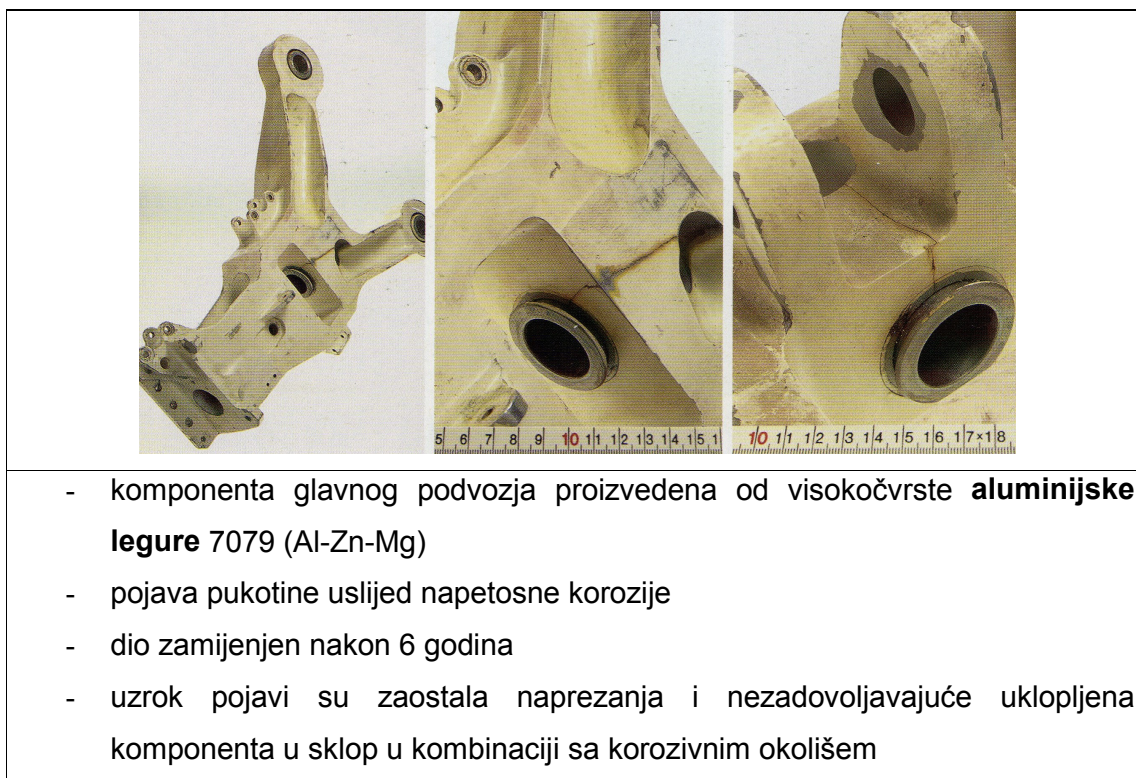


- turbinska lopatica proizvedena od **legure nikla i kobalta**
- nepoznato vrijeme upotrebe
- pojava rupičaste korozije uslijed visokih temperatura (1100 – 1200°C) dimnih plinova nastalih izgaranjem goriva koje je bilo kontaminirano vanadijem i sumporom
- sprečavanje pojave moglo se izbjeći korištenjem nekontaminiranog goriva

Slika 5-4 Komponente zrakoplovnog motora[7]

### 5.2.5. Napetosna korozija

Pojava napetosne korozije je jedan od češćih korozijskih pojava u komponentama zrakoplova. Ovaj oblik korozije je teško otkriti jer se ne događa nužno na površini. Kako su mnoge komponente zrakoplova podvrgnute visokim naprezanjima i korozivnom okolišu, mogućnost pojave napetosne korozije treba uzeti uvijek u obzir. Načini preventivne zaštite uključuju odgovarajuće konstruirane dijelove, odabir materijala koji je manje podložan ovoj vrsti korozije te nanošenje zaštitnih prevlaka.

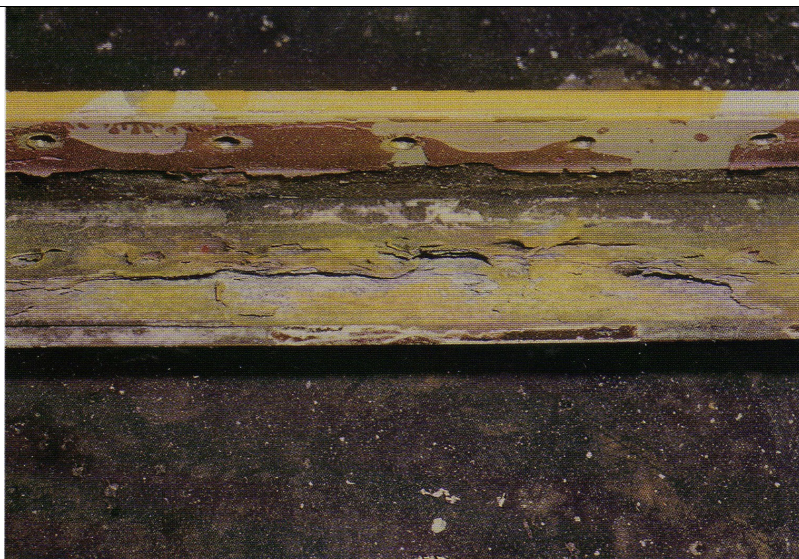


Slika 5-5 Komponenta podvozja zrakoplova[7]

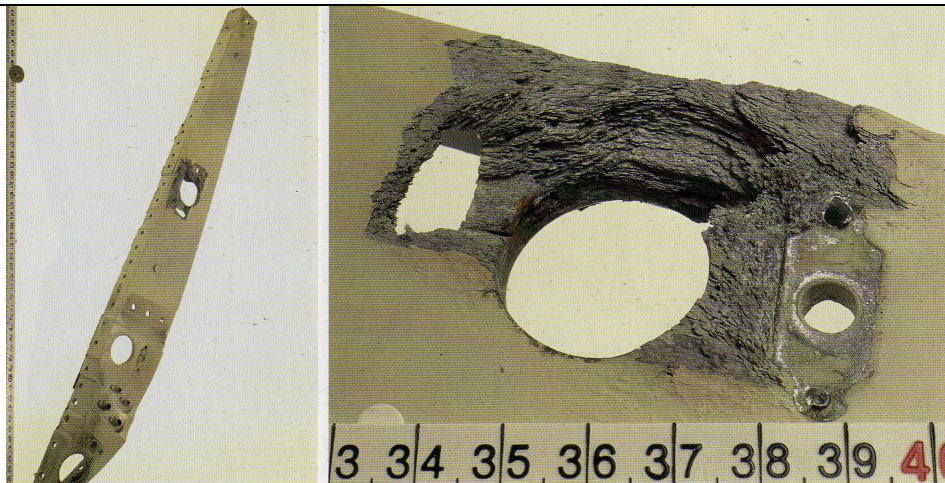
### 5.2.5. Interkristalna korozija

Pojedine legure aluminija su iznimno podložne interkristalnoj koroziji i pojavi eksfolijacije. Kako su legure aluminija najčešći konstrukcijski materijal u zrakoplovstvu, treba obratiti posebnu pozornost na pojavu navedene vrste korozije.





- uzdužnica proizvedena od **alumijske legure 7075** (Al-Zn-Mg)
- dio zamijenjen nakon 11 godina
- morski okoliš i voda koja se skupljala na navedenom mjestu, utjecali su na pojavu interkristalne korozije
- potrebno je koristiti materijal koji je otporniji na pojavu interkristalne korozije



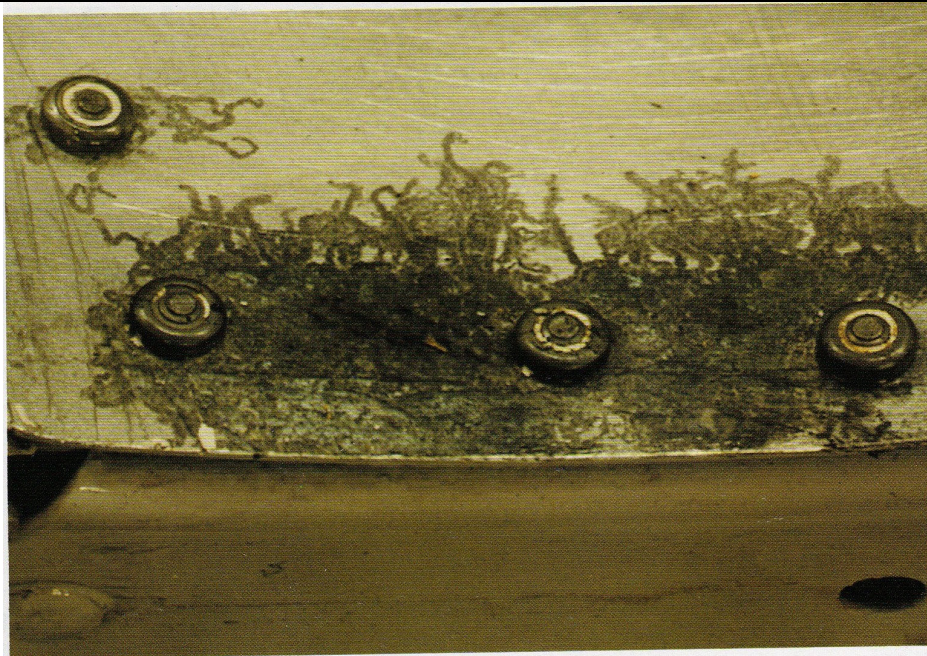
- rebro proizvedeno od **alumijske legure 7075** (Al-Zn-Mg)
- vrijeme u upotrebi 19 godina
- oštećena zaštitna prevlaka unutar otvora dovela je do pojave interkristalne korozije odnosno eksfolijacije
- nužna je zamjena rebra te poboljšana zaštita

Slika 5-6 Komponente patrolnog zrakoplova ratne mornarice[7]



### 5.2.6. Crvolika korozija

Crvolika korozija (eng. "filiform corrosion") se događa između površine metala i zaštitne prevlake nanosene na njega. Kod zrakoplova je najčešće u blizini dodira oplata i zakovica gdje je došlo do prodora vlage ispod zaštitnih prevlaka. Kako se ova vrsta korozije razvija ispod nanosene prevlake, može dugo proći neopažena. Sama crvolika korozija nije opasna ali kako uništava zaštitnu prevlaku može doći do pojave drugih opasnijih oblika korozije. Nakon što je otkrivena može se izvršiti popravak na način da se odstrane nastali produkti korozije i ponovno nanese zaštitna prevlaka.



- kućište kotača na zrakoplovu proizvedeno od **alumijske legure** i zaštićeno nanošenjem prevlake
- vrijeme upotrebe 5 godina
- crvolika korozija se pojavila ispod zaštitne prevlake u blizini zakovica gdje je došlo do prodora vlage ispod zaštitne prevlake
- poboljšanje zaštite se postiže nanošenjem inhibitora korozije na kritična mjesta

Slika 5-7 Kućište kotača na zrakoplovu[7]

### 5.2.7. Mikrobiološka korozija

Poznato je da se mikrobiološka korozija događa u spremnicima za gorivo na zrakoplovu. Mikroorganizmi se hrane gorivom i kondenziranim vodenom parom a ponekad i materijalom spremnika. Obično su gljivice glavni krivci za mikrobiološku koroziju na zrakoplovu ali ponekad i bakterije i plijesan mogu uzrokovati štetu. Tropska atmosfera najčešće uzrokuje razvoj mikroorganizama. Poliuretanski premazi nisu dovoljna zaštita jer mikroorganizmi mogu prodrijeti kroz njih te se koriste posebna sredstva za uništenje mikroorganizama[8].



- vratašca spremnika goriva proizvedena od **aluminijске legure 2024** (Al-Cu-Mg)
- vrijeme upotrebe 6 mjeseci
- mikrobiološke aktivnosti bakterija (*Pseudomonas fluorescens*, *micrococcus*), plijesni (*Rhodoturula*) i gljivica (*Cladosporium resinae*, *Penicillium chrysogenum*) dovele su do nastanka sluzi i produkata metabolizma koji su uzrokovali pojavu rupica
- potrebno je koristiti zaštitnu prevlaku otpornu na gljivice, vršiti često čišćenje spremnika te dodati aditive u gorivo koji sprečavaju razvoj mikroorganizama

Slika 5-8 Vratašca zrakoplovnog spremnika goriva[7]



### 5.3. Oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uslijed zamora materijala

Zamor materijala je proces akumuliranja oštećenja, ciklus po ciklus, u materijalu koji uslijed izloženosti cikličkom opterećenju doživljava promjenljiva naprezanja niža od granice razvlačenja. Do loma dolazi nakon određenog broja promjena opterećenja, kad akumulirano oštećenje dosegne kritičnu razinu, odnosno kada preostali dio poprečnog presjeka više ne može podnijeti opterećenje[16].

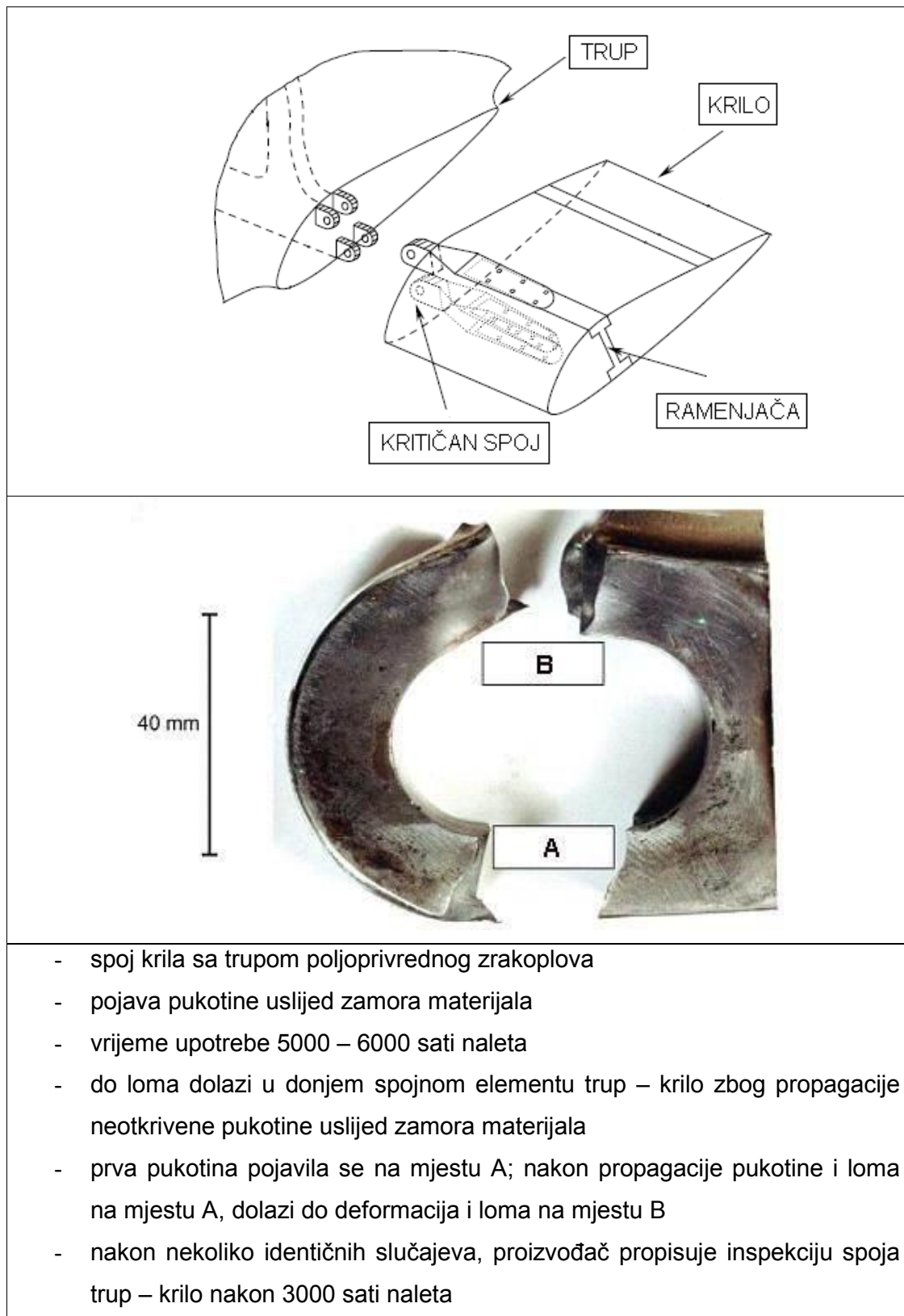
Proces zamora materijala sastoji se od tri faze:

- nastanka pukotine;
- širenja pukotine;
- konačnog loma (preostalog dijela poprečnog presjeka).

Zrakoplov je konstantno tijekom cijelog vremena eksploatacije izložen različitim cikličkim procesima (npr. polijetanje i slijetanje) te nastanak pukotina uslijed zamora materijala predstavlja ozbiljnu opasnost za sigurnost zrakoplova.



Slika 5-9 Nosač prozora na zrakoplovu[7]



Slika 5-10 Spoj trup – krilo poljoprivrednog zrakoplova[17]

## 6. PROTUPOŽARNI ZRAKOPLOV CANADAIR CL – 415

Zrakoplov Canadair CL-415, te njegova starija inačica CL-215 iz koje se i razvio, proizvod je kanadske tvrtke Bombardier Aerospace Inc. Osim protupožarne verzije tog zrakoplova koja se koristi u Hrvatskoj, još postoje i poljoprivredna verzija za zaprašivanje polja i šuma, patrolna verzija za priobalni pojas, transportna verzija, te verzija za spašavanje unesrećenih na moru tzv. "search & rescue" verzija. Ideja za razvoj ovog zrakoplova pojavila se u Kanadi, zemlji koja obiluje vodenim površinama, a gdje su nažalost kao i kod nas česti katastrofalni šumski požari.



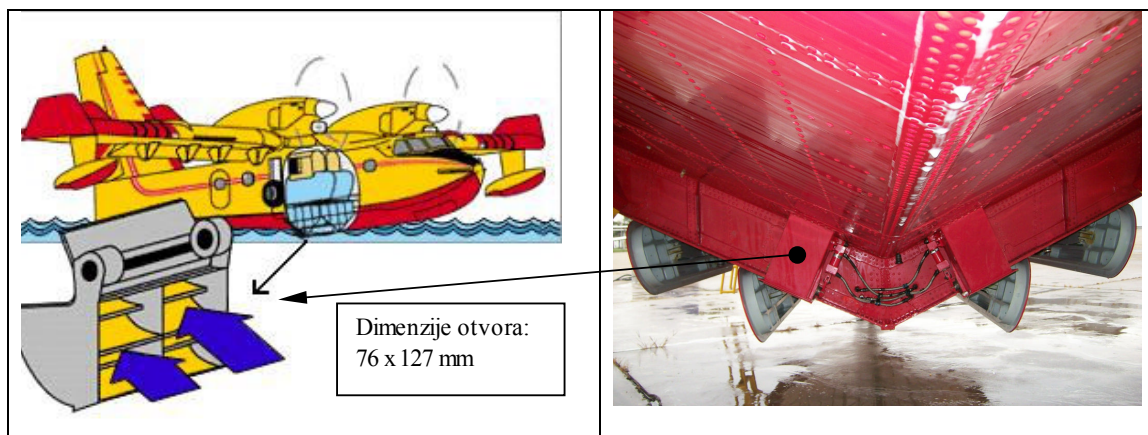
Protupožarni zrakoplov Canadair CL-415, snimljen tijekom pranja za vrijeme posjete Zrakoplovno tehničkom zavodu 09/2008.

Slika 6-1 Canadair CL-415[18]

U svrhu iskorištenja tih vodenih površina prilikom gašenja požara, javila se ideja da se konstruira amfibijski zrakoplov koji bi prilikom glisiranja skupljao vodu i kasnije je ispuštao iznad požarišta. Time bi se ujedinilo nekoliko dobrih karakteristika: iskorištenje neograničenih količina vode u rijekama i jezerima, njeno brzo skupljanje, te brzi transport vode do požarišta. Samo ispuštanje velike količine vode iznad požarišta ima efekt tzv. "vodene bombe", koja ne samo da gasi požar na samoj površini tla, nego i penetrira dublje ispod površine tla gaseći i "jezgre" požara. Za gašenje požara ovaj zrakoplov također može koristiti i pjenu.

Zrakoplovu CL-415 potrebno je samo 12 s da pri brzini od 130 km/h (30 čvorova) glisiranjem na vodenoj površini u svojim spremnicima sakupi ukupno 6137 litara vode

(starija verzija CL-215 ima ukupni volumen spremnika od 5346 litara). Naravno, spomenute vrijednosti zahvata vode vrijede samo za idealni slučaj, u praksi se obično zahvaća manje vode. Sam princip usisavanja vode može se najbolje vidjeti iz slijedeće slike:



Slika 6-2 Princip usisavanja vode[18,19]

Dva uvodna grla za usisavanje vode prilikom glisiranja zakreću se za  $90^\circ$  i počinju zahvaćati vodu. Voda zahvaćena usisnim grlima uslijed kinetičke energije se transportira u spremnik. Dakle, nema nikakve pumpe koja bi usisavala vodu i transportirala je dalje u spremnik. Vodena staza za skupljanje vode, mora biti duga barem 410 m, te široka barem 90 m i to iz sigurnosnih razloga, kako pilot ne bi plovcima koji se nalaze ispod krila, a koji onemogućuju prevrtanje zrakoplova tijekom plutanja ili glisiranja, udario u obalu. Sama vodena staza ne mora biti ravna, pošto pilot može tijekom glisiranja manevrirati zrakoplovom savladavajući blage zavoje npr. rijeke ili izbjegavati plicake na jezerima.

Minimalna dubina vodene površine s koje se skuplja voda je 2 m. Najkraća udaljenost za uzimanje vode je 1340 metara, što predstavlja udaljenost od točke u kojoj se zrakoplov nalazi na 15 m iznad vodene površine pri slijetanju na vodenu površinu do točke u kojoj se zrakoplov nalazi na visini od 15 m nakon uzlijetanja s vodne površine[19,20].

Tablica 6-1 Osnovni tehnički podaci zrakoplova Canadair CL-415[19]

Dužina	19.81 m	Visina	9.1 m
Raspon krila	28.38 m	Maksimalna snaga motora	1775 kW
Dužina uzlijetanja	701 m	Dužina slijetanja	670 m
Dužina skupljanja vode	1340 m	Maksimalna poletna težina	17170 kg
Maksimalna brzina	365 km/h	Maksimalni vrhunac leta	6 100 m
Maksimalno vrijeme leta	6-7 h	Maksimalno vrijeme djelovanja	4 h
Prosječna potrošnja goriva tijekom leta	1114 L/h	Prosječna potrošnja goriva iznad požarišta	1160 L/h
Kapacitet spremnika za vodu	6130 L	Kapacitet spremnika za pjenu	340 L
Vrijeme punjenja spremnika vodom	do 12 s	Maksimalna pogodna visina valova	2 m
Površina ispuštene vode	107x25 m	Dolet	2430 km

## 6.1. Zaštita od korozije zrakoplova Canadair CL- 415

Opisana antikorozivna zaštita odnosi se na procedure koje se primjenjuju u Zrakoplovno tehničkom zavodu u Velikoj Gorici.

Zaštita aluminija i njegovih legura vrši se u nekoliko koraka:

1. Čišćenje površine – površina mora biti očišćena od nečistoća ili produkata korozije ukoliko se sanira korodirani dio;
2. Odmašćivanje – nakon temeljitog čišćenja aluminija, koristi se Sredstvo za odmašćivanje aluminija (proizvođač Chromos);
3. Stvaranje zaštitne prevlake – sredstvo Alodine 1201 (proizvođač Henkel). Aluminij se premazuje kemijskim sredstvom na bazi kroma koje uzrokuje nastajanje zaštitne prevlake. Zaštitna prevlaka je žućkasto smeđe boje te postaje dio površine aluminija. Pruža zaštitu od korozije te dobro prihvaćanje slijedećih slojeva primarnog premaza i boje.
4. Primarni premaz – sredstvo 10P4-2 (proizvođač ANAC). Dvokomponentni epoksi primarni premaz nanosi se u dva sloja ukupne debljine 120  $\mu\text{m}$ . Pruža izvrsnu zaštitu od korozije te dobro prihvaćanje epoksi i poliuretanskih završnih premaza.
5. Završni premaz – Dvokomponentna poliuretanska boja se koristi kao završni premaz. Nanosi se u tri sloja ukupne debljine 180  $\mu\text{m}$ .
  - a) crvena boja - 7600 (proizvođač Tempo aerospace)
  - b) žuta boja – Desothane HS CA8800 (proizvođač PPG aerospace)



Tijekom eksploatacije zrakoplova redovito se upotrebljava dodatna zaštita u obliku inhibitora. Inhibitor se nanosi na mjesta kronično podložna koroziji te na teško dostupna mjesta. Nanosi se zračnim prskanjem u dostupne otvore na konstrukciji. Inhibitor u upotrebi:

- Procyon corrosion inhibitor (proizvođač LPS Laboratories)



Slika 6-5 Primjena inhibitora[18]

## 6.2. Redoviti godišnji pregled zrakoplova Canadair CL- 415

Zrakoplov Canadair CL-415 bio je dostupan tijekom redovitog godišnjeg pregleda u Zrakoplovno tehničkom zavodu u Velikoj Gorici.

### 6.2.1. Korozijska oštećenja

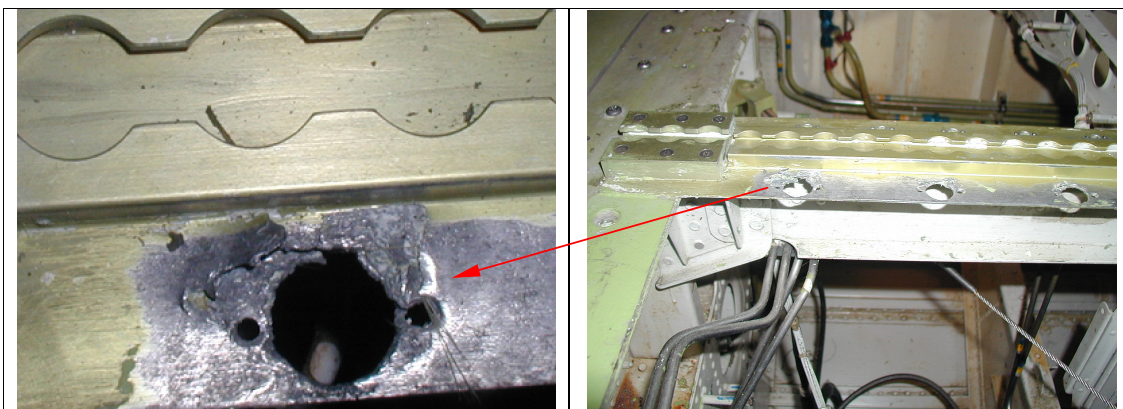
Uvjeti eksploatacije zrakoplova u morskoj atmosferi te slana morska voda i pjena koja se koristi za gašenje požara, omogućuju ubrzanu pojavu korozije. U slijedećim primjerima navedena su neka od otkrivenih korozijskih oštećenja.



Spremnik za vodu – slana voda unutar spremnika utjecala je na pojavu potpovršinske korozije te dovela do bubrenja zaštitnog premaza. Crvene strelice pokazuju mjesta nastalih korozijskih oštećenja unutar spremnika.

Slika 6-6 Spremnik za vodu[18]





Noseća konstrukcija panela poda – spremnik za pjenu bio je pričvršćen na noseći element; došlo je do kontaminacije pjenom iz spremnika; pojava korozije u procijepu uzrokovala je smanjenje debljine nosećeg elementa.

Slika 6-7 Noseća konstrukcija panela poda[21]



Pojava opće korozije na amortizeru

Rupičasta korozija u području procijepa na mjestu spoja amortizera sa ramenom stajnog trapa

Slika 6-8 Korozija na amortizeru[21]

### 6.2.2. Primjeri oštećenja nastalih tijekom eksploatacije

	
<p>Oštećenje nastalo udarom u žice dalekovoda te privremeno popravljeno do odlaska u Zrakoplovno tehnički zavod gdje će se vršiti zamjena oštećenog dijela.</p>	
	
<p>Oštećenje uzrokovano sudarom sa pticom. Udari ptica mogu imati i ozbiljne posljedice ukoliko zrakoplov uleti u jato ili do udara dođe u kritičnu komponentu.</p>	
	
<p>Uslijed povećanih naprezanja tijekom leta došlo je do pojave pukotine unutar strukture zrakoplova i do pucanja brtvila po spojevima na oplati zrakoplova.</p>	

Slika 6-9 Oštećenja tijekom eksploatacije[21]

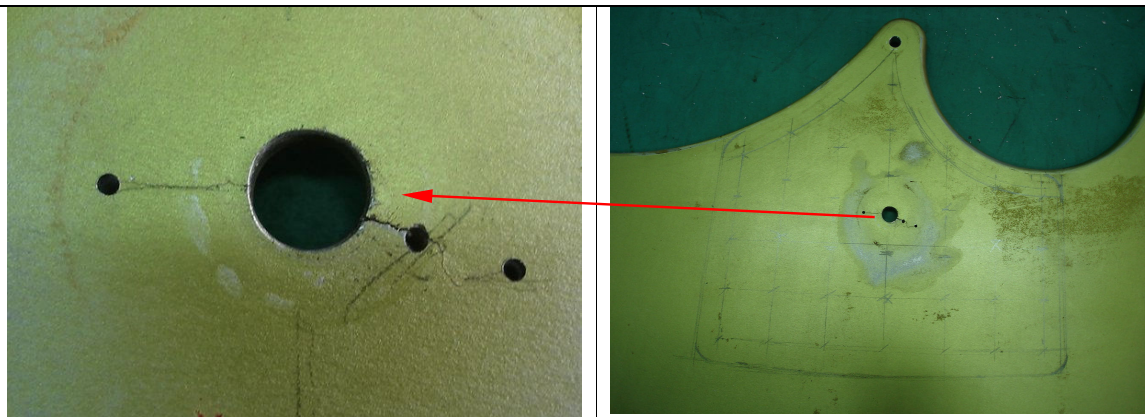


### 6.2.3. Sanacija pukotine na valobranu

Valobran se nalazi sa prednje donje strane zrakoplova. Prilikom slijetanja na vodene površine, javljaju se velika naprezanja na mjestima spoja valobrana sa trupom zrakoplova. Prilikom redovitog godišnjeg pregleda otkrivena je pukotina te je praćena procedura sanacije propisana u "Maintenance manual-u".



Smještaj valobrana na zrakoplovu i vidljiva mjesta spojeva valobrana sa trupom zrakoplova nakon što je uklonjen.



Pukotina se pojavila na mjestu spoja valobrana sa trupom zrakoplova. Do širenja je došlo iz provrta. Zaustavljanje propagacije pukotine pokušano je sa manjim provrtima ali kako to nije dalo rezultata kada je pukotina dosegla kritičnu veličinu propisanu u "Maintenance manual-u", morala se izvršiti sanacija.

Slika 6-10 Smještaj valobrana na zrakoplovu i pojava pukotine[18]



Za sanaciju pukotine koristi se aluminijska legura 7075. Oblik i debljina materijala za sanaciju te raspored zakovica na saniranom mjestu u potpunosti su definirani u "Maintenance manual-u".



Nakon što je dio zakovicama spojen na valobran, slijedi nanošenje brtvila (P/S 870B) na mjesta spoja dvaju dijelova radi sprečavanja ulaska morske vode u procijep što bi moglo uzrokovati pojavu korozije. Valobran je spreman za zaštitu premazima nakon sušenja brtvila.

Slika 6-11 Sanacija pukotine[18]

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio diplomskog rada podijeljen je u dva dijela:

- priprema i bojenje ispitnih uzoraka u Zrakoplovno tehničkom zavodu
- ispitivanje provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

Pripremljena su tri ispitna uzorka. Svaki uzorak sastoji se od dvije pločice međusobno spojene zakovicama. Ovaj način spajanja ostavio je zračnost odnosno procijep između pločica. Pojava korozije u procijepu je iznimno čest pojavni oblik u zrakoplovnim konstrukcijama, te je cilj eksperimentalnog dijela bilo provjeriti korozijsku postojanost materijala korištenog na zrakoplovu Canadair CL-415. Materijal uzoraka je aluminijska legura 2024 (tablica 3-3).

Tablica 7-1 Plan ispitivanja

Uzorak	Dimenzije [mm]	Zaštitno sredstvo	Primarni premaz	Boja	Ispitivanje
		Alodine 1201 Henkel	10P4-2 ANAC	7600 Tempo aerospace	
1.	130x78x1 130x46x1	-	-	-	Slana komora
2.	145x66x1 145x46x1	+	-	-	3.5% -tna otopina NaCl
3.	145x68x1 145x42x1	+	dva sloja ukupne debljine 120 $\mu\text{m}$	tri sloja ukupne debljine 180 $\mu\text{m}$	3.5% -tna otopina NaCl



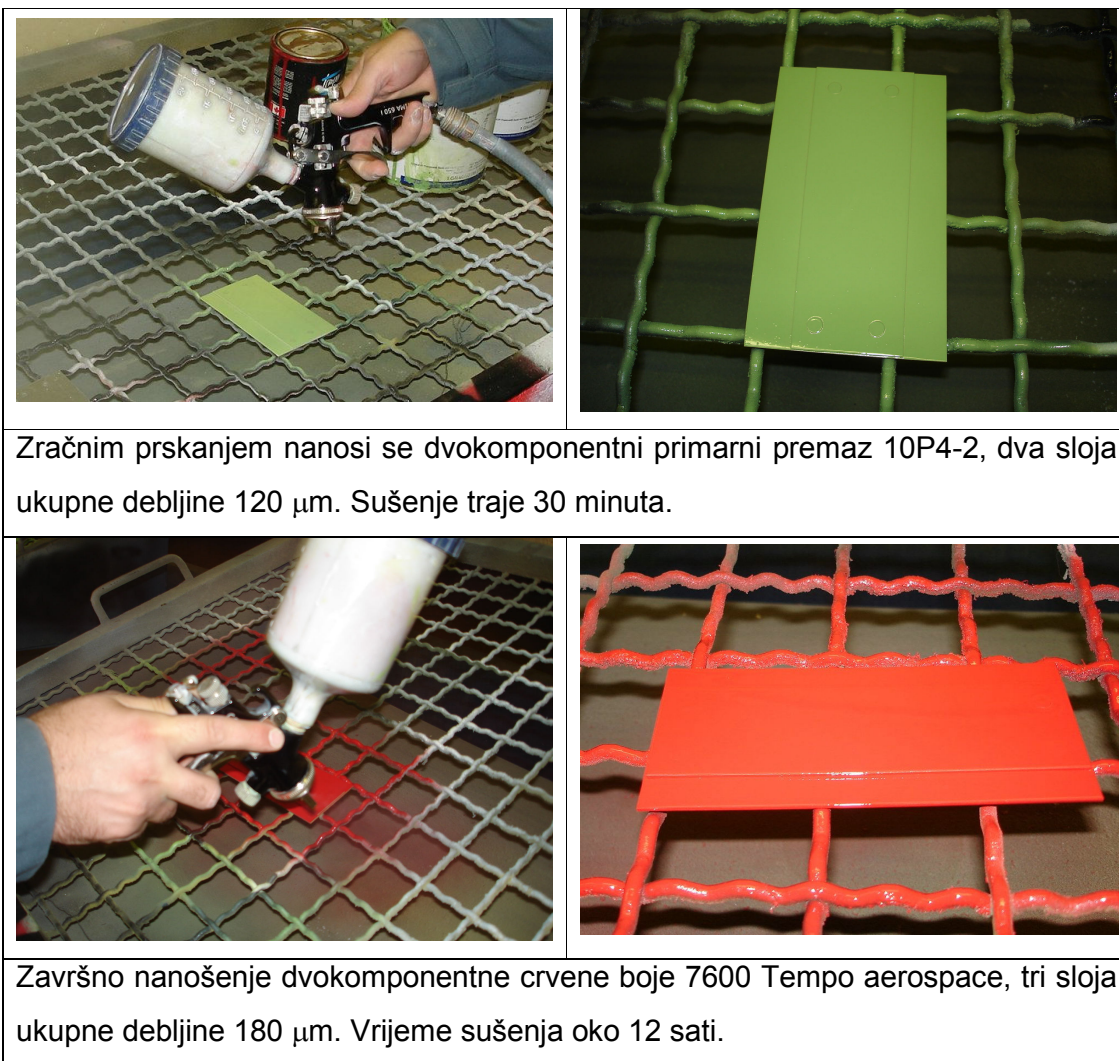
## 7.1. Priprema i bojenje uzoraka

Na slici 7-1 prikazana je priprema uzorka broj tri. Način pripreme uzorka broj dva je identičan osim što nisu nanесeni primarni premaz i boja dok je uzorak broj jedan nezaštićen.



Slika 7-1 Priprema uzorka za nanošenje primarnog premaza i boje[18]





Slika 7-2 Nanošenje primarnog premaza i boje na ispitni uzorak[18]

## 7.2. Ispitivanje u slanoj komori

Laboratorijska ispitivanja se najčešće provode kontinuiranim izlaganjem uzoraka mediju određenog sastava pri konstantnoj temperaturi tijekom predviđenog vremena. Izlaganje je statičko, odnosno dinamičko, ako se vrši uz relativno gibanje između uzoraka i medija. Poželjno je da laboratorijski pokusi daju upotrebljive rezultate u što kraćem roku, pa su takva ispitivanja redovito ubrzana, tj. obavljaju se pod oštrijim uvjetima od onih koji se očekuju u praksi, što se postiže promjenom sastava medija, temperature, brzine gibanja, itd.

Atmosferska se korozija laboratorijski ispituje u komorama. U načelu, to su termostatski-higrostatski uređaji za stabilizaciju temperature i relativne vlažnosti,

eventualno uz dodatak korozivnih tvari (npr.  $\text{SO}_2$  ili kapljica  $\text{NaCl}$ ). Najvažnije su komore:

- Kesternichova, u kojoj se dodavanjem  $\text{SO}_2$  oponaša industrijska atmosfera
- slana, punjena maglom otopine  $\text{NaCl}$  radi simulacije morske atmosfere

Ispitivanje uzorka je provedeno u slanoj komori prema normi HRN ISO 9227 u komori Ascott, model S450. Parametri ispitivanja navedeni su u tablici 7-2.

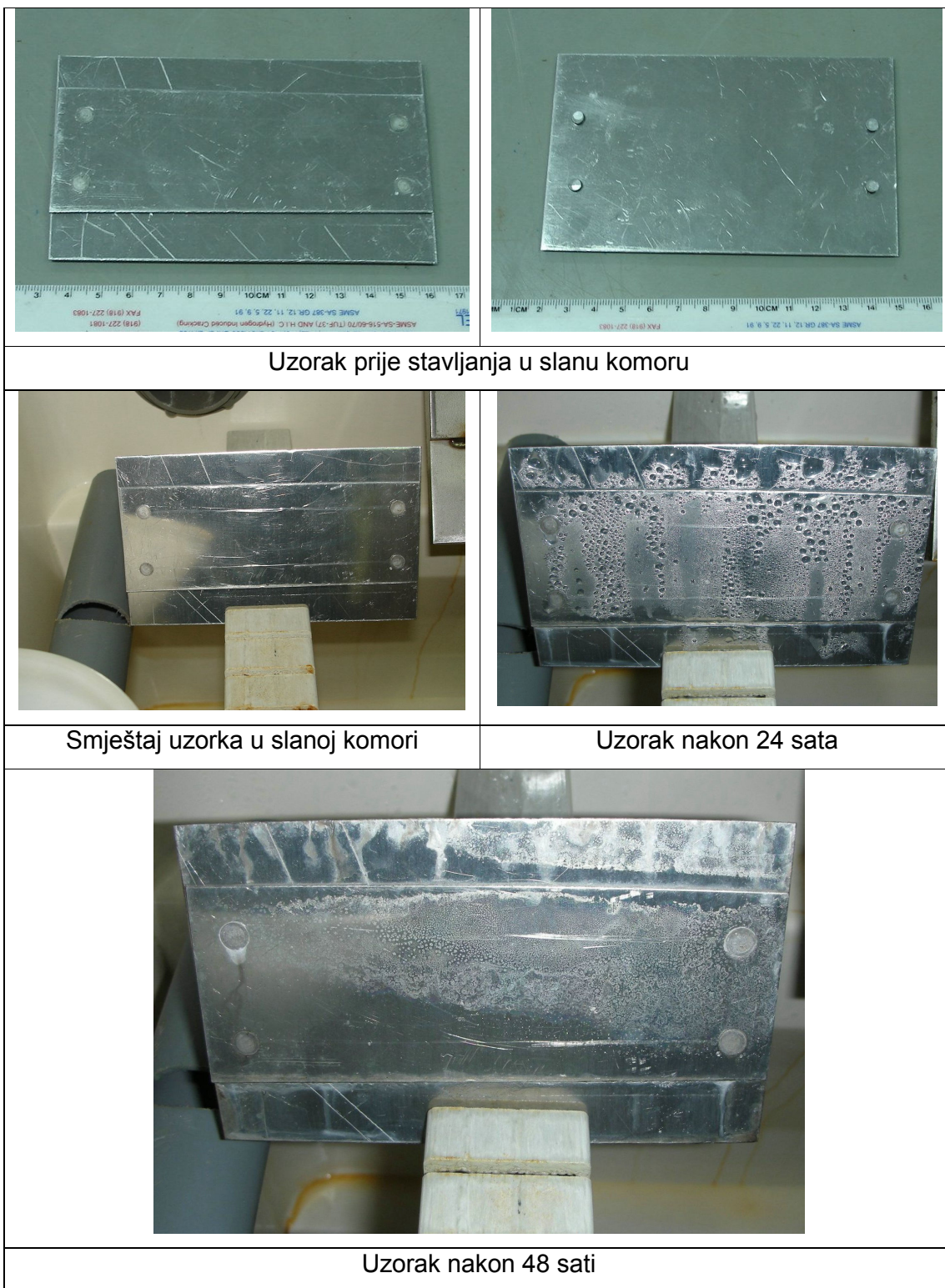


Slika 7-3 Slana komora u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu[22]

Tablica 7-2 Parametri ispitivanja

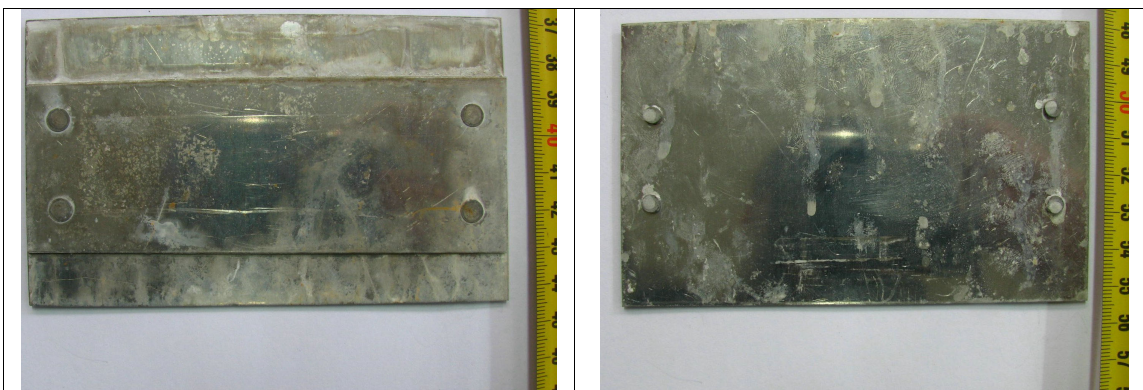
<b>Parametri ispitivanja - norma HRN ISO 9227</b>	
Trajanje ispitivanja, h	48
Temperatura ispitnog prostora, °C	$35 \pm 0.1$
Volumen ispitnog prostora, l	450
Temperatura ovlaživača komprimiranog zraka, °C	47
Tlak komprimiranog zraka, bar	0.98
Korištena otopina	$\text{NaCl}$
Koncentracija korištene otopine, %	5
Količina sakupljenog kondenzata, ml / $80\text{cm}^2$ / h	2.0
PH vrijednost kondenzata pri $25 \pm 2$ °C	7.14
Provodljivost destilirane vode, $\mu\text{S}/\text{cm}$ pri $25 \pm 2$ °C	$\leq 10$

Ispitivanje uzorka broj 1 u slanoj komori započelo je 15.10.2008. u 9:35h i trajalo je 48 sati, do 17.10.2008 u 9:35h.

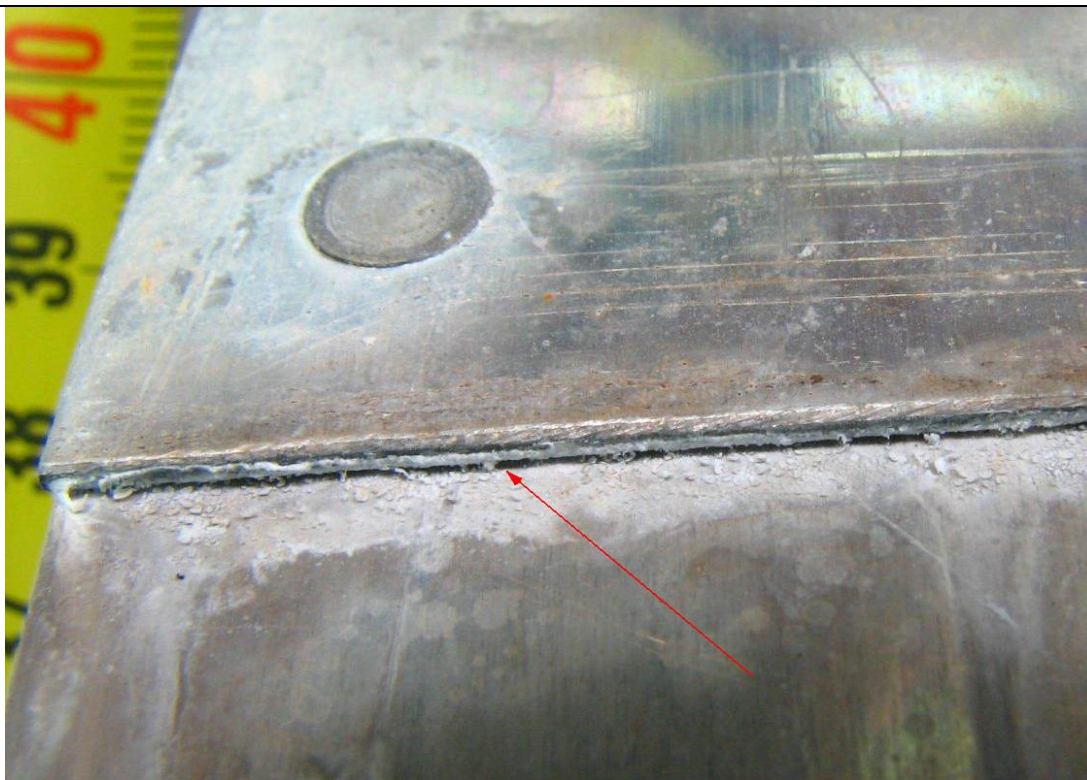


Slika 7-4 Ispitivanje uzorka broj 1 u slanoj komori[22]





Uzorak broj 1 nakon 48 sati u slanoj komori



Na spoju dviju pločica vidljivi začeci pojave korozije u procijepu

Slika 7-5 Uzorak broj 1 nakon 48 sati u slanoj komori[22]

Na potpuno nezaštićenom uzorku broj 1 nakon 48 sati ispitivanja, procijep je bio glavni inicijator pojave korozije.

### 7.3. Ispitivanje uranjanjem u 3.5% -tnoj otopini NaCl

Norma ASTM G44 određuje metode i opremu za ispitivanje korozije metodom uranjanja uzoraka u korozivni medij.

Koristi se za ispitivanje aluminijskih i željeznih legura u 3.5% -tnoj otopini natrijevog klorida (NaCl) i vode. Dozvoljeno je korištenje ove ispitne metode samo ukoliko su uzorci nakon izranjanja iz otopine izloženi okolišnom zraku odnosno ako im je omogućeno normalno sušenje u atmosferi.

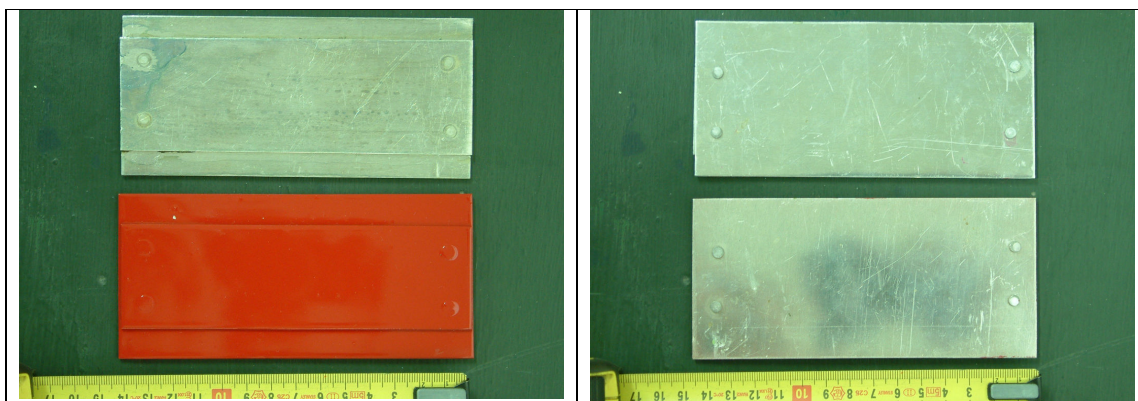
Ispitivanje se sastoji od ciklusa u trajanju od jednog sata. Ciklus je podijeljen u dva dijela, 10 minuta uranjanja u 3,5% -tnu vodenu otopinu NaCl-a te nakon toga 50 minuta sušenja uzoraka slobodno u atmosferi. Ovaj ciklus se neprekidno ponavlja tijekom 24 sata u danu, a broj dana ispitivanja posebno se utvrđuje za svaku leguru. Uobičajeno ukupno vrijeme ispitivanja za aluminijske i željezne legure je 20 do 90 dana. Ispitivanje može trajati i dulje od 90 dana, ovisno o zahtjevima odnosno o korozijskoj otpornosti ispitivane legure prema slanoj otopini.



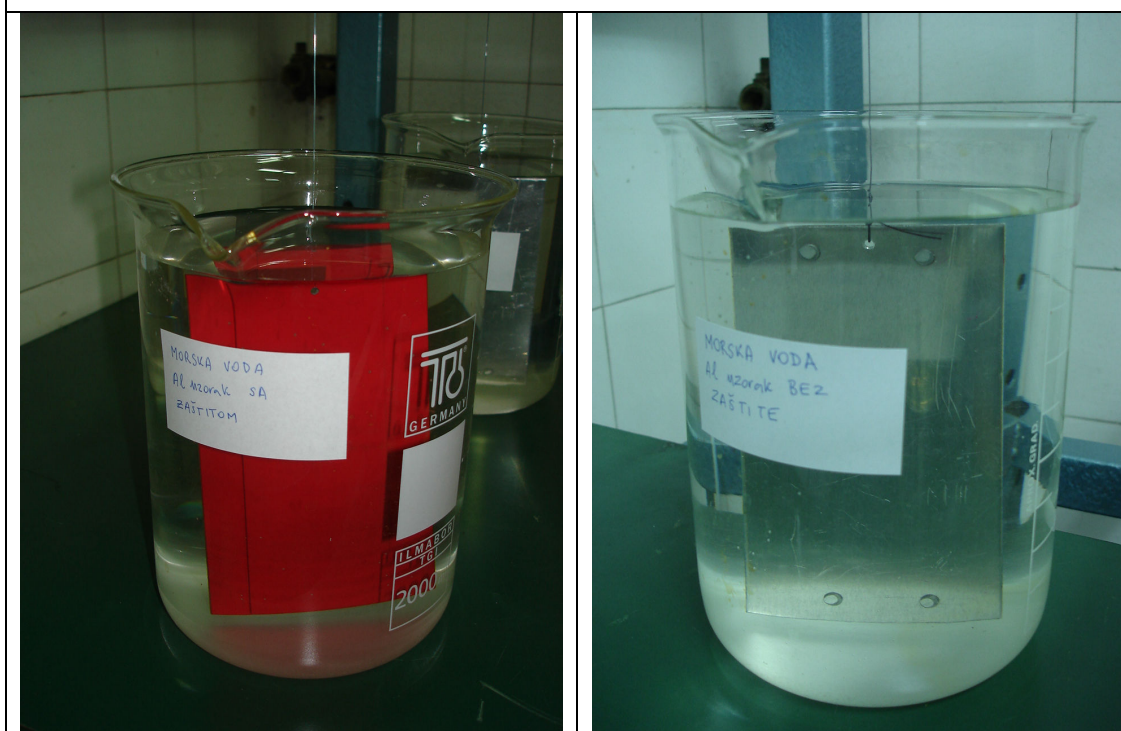
Slika 7-6 Ispitivanje uranjanjem u 3.5% -tnoj otopini NaCl[22]



Ispitivanje uzoraka broj 2 i 3 u 3.5% -tnoj otopini NaCl započelo je 23.10.2008. u 13:30h i trajalo je do 31.10.2008. u 12:15h.

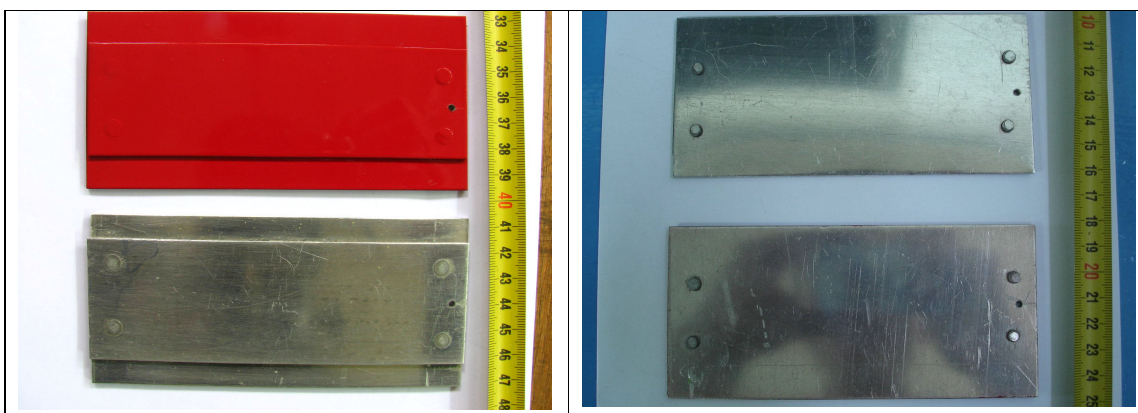


Uzorci broj 2 i 3 prije ispitivanja

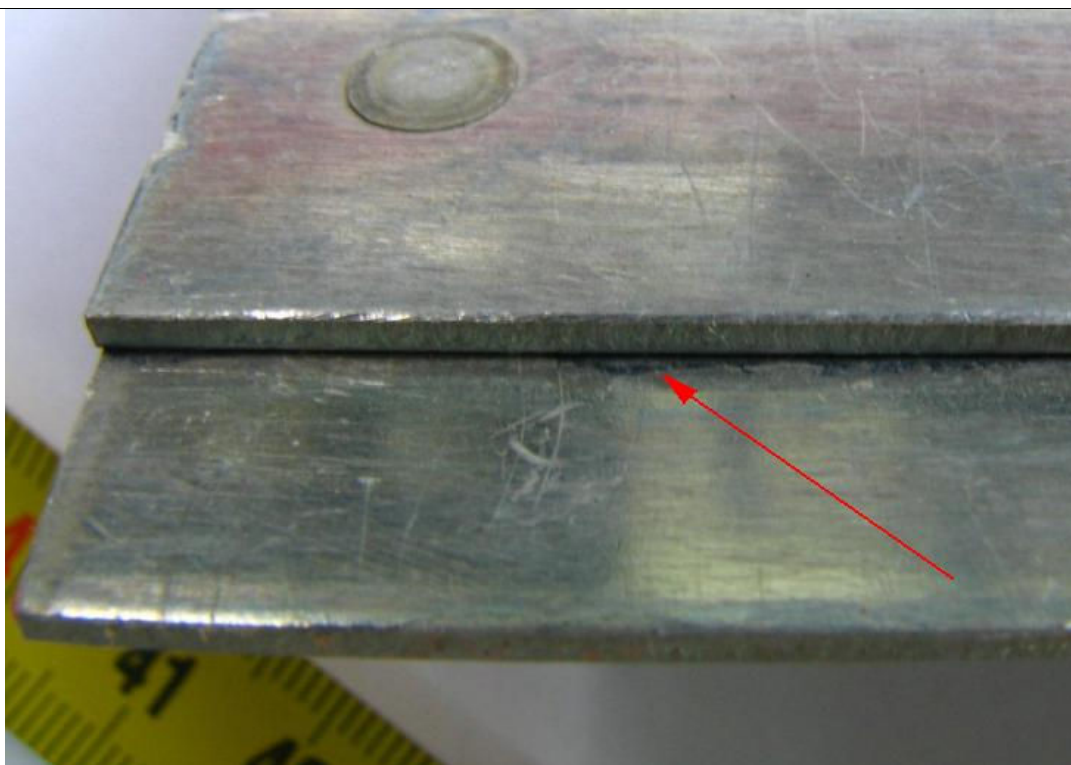


Uzorci broj 2 i 3 za vrijeme ispitivanja

Slika 7-7 Ispitivanje uzoraka broj 2 i 3[22]



Uzorci 2 i 3 nakon 8 dana ispitivanja



Procijep na uzorku broj 2

Slika 7-8 Uzorci 2 i 3 nakon ispitivanja[22]

Uzorak broj 3 koji je bio potpuno zaštićen primarnim premazom i bojom nije pokazao nikakve promjene što je bilo i očekivano. U procijepu uzorka broj 2 pojavila se diskoloracija (slika 7-8) te bi na tome mjestu u dužem ispitivanju bila očekivana pojava korozije.

## 8. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu obrađena je problematika korozijskih oštećenja u zrakoplovstvu. Opisani su materijali koji se najčešće upotrebljavaju te njihovo ponašanje u odnosu na pojedine pojavne korozijske oblike. Ukratko su prikazane metode koje se koriste u sprečavanju pojave korozije, od procesa projektiranja zrakoplova, odabira konstrukcijskih materijala pa do dugogodišnjeg održavanja tijekom eksploatacije te moguća oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uslijed djelovanja korozije.

Korektno projektirana i izvedena zaštita od korozije od početka životnog vijeka zrakoplova od presudne je važnosti za vijek trajanja s obzirom da je zrakoplov vrlo složena konstrukcija izložena agresivnoj sredini. Pravilnom uporabom suvremenih tehnologija zaštite od korozije te redovitim pregledima i održavanjem, postiže se planirana trajnost i funkcionalnost zrakoplova te se ulaganja u zaštitu od korozije višestruko vraćaju kroz smanjene troškove održavanja i kroz raspoloživost zrakoplova tijekom eksploatacije. Zrakoplov je specifična konstrukcija u kojoj havarija ne znači samo zastoj u radu i dodatne troškove za održavanje ili zamjenu oštećenog dijela nego u ekstremnim situacijama potpuni gubitak zrakoplova i ljudskih života.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su korozijska ispitivanja uzoraka od aluminijske legure 2024 (Al-Cu-Mg), korištene na zrakoplovu Canadair CL – 415. Ispitivanja provedena u slanoj komori na nezaštićenom uzorku potvrdila su da procijep između dva dijela predstavlja glavnu opasnost nastanka korozijskog oštećenja. Ispitivanje uranjanjem nije dovelo do značajnih promjena na uzorcima zbog nemogućnosti vremenski dužeg ispitivanja, iako pojava diskoloracije u procijepu uzorka 2 ukazuje na potencijalno mjesto nastanka korozije. Pojava diskoloracije na uzorku 2 je u skladu sa rezultatima dobivenim u slanoj komori te ukazuje da je procijep kritično mjesto za pojavu korozije. Uzorak koji je bio zaštićen propisanim metodama zaštite pokazao je korozijsku postojanost.



## 9. LITERATURA

- [1] Esih I., Osnove površinske zaštite, FSB, Zagreb, 2003.
- [2] [www.nace.org](http://www.nace.org)
- [3] Roberge P.R., Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1999.
- [4] Esih I., Dugi Z., Tehnologija zaštite od korozije I, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [5] [www.fsb.hr/korozija](http://www.fsb.hr/korozija)
- [6] [www.airliners.net](http://www.airliners.net)
- [7] During E.D., Corrosion atlas: A collection of illustrated case histories, Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
- [8] Craig B.D., Lane R.A., Rose D.H., Corrosion prevention and control: A program management guide for selecting materials, AMMTIAC, 2006.
- [9] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [10] Canadair CI-415: Structural repair manual, Volume 1, Bombardier Inc.
- [11] [www.azom.com](http://www.azom.com)
- [12] Trethewey K.R., Chamberlain J., Corrosion for science and engineering, Longman scientific & technical, Essex, 1995.
- [13] Stupnišek – Lisac E., Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2007.
- [14] [www.key-to-nonferrous.com](http://www.key-to-nonferrous.com)
- [15] [www.boeing.com](http://www.boeing.com)
- [16] Parunov J., Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija - nastavni materijal, FSB, Zagreb, 2008

- [17] Witek L., Failure analysis of the wing-fuselage connector of an agricultural aircraft, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Rzeszow, Poland, 2004.
- [18] Snimljeno u Zrakoplovno tehničkom zavodu tokom posjeta 09/2008 i 10/2008
- [19] [www.bombardier.com](http://www.bombardier.com)
- [20] [www.zrakoplovstvo.net](http://www.zrakoplovstvo.net)
- [21] Arhiva Zrakoplovno tehničkog zavoda
- [22] Snimljeno u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

## **10. PRILOG**